



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

MUKAUTUVAN TARTTUJAN SUUNNITTELU ROBOTTISOVEL- LUKSESSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Asko Ellman
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Teknisten tieteiden tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 5.maaliskuuta
2014

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

LYYTINEN, JANNE: Mukautuvan tarttujan suunnittelu robottisovelluksessa

Diplomityö, 43 sivua, 16 liitesivua

Huhtikuu 2014

Pääaine: Konejärjestelmien suunnittelu

Tarkastaja: professori Asko Ellman

Avainsanat: robotiikka, robottisolu, mukautuva tarttuja, magneettitarttuja, tarrain, tarttujasuunnittelu, suunnitteluprosessi

Robotin tarttuja on yleinen suunnittelutyötä edellyttävä konstruktio asiakasräätälöitävien robotiikan toimitusprojektien sisällöissä. Erilaisille projekteille suunnitelluissa tarttujissa esiintyy huomattavaakin vaihtelua, koska suunnittelun lähtökohtana on aina asiakkaan työkappale. Työkappaleiden monimuotoisuudesta seuraa väistämättä monimuotoisia sovelluskohtaisia tarttujia.

Tässä työssä suunnitellaan tarttuja ajoneuvoteollisuuden komponenttien tuotantojärjestelmään kytkettyyn robottisoluun. Työn aluksi esitellään solun toimintaa ongelman määrittämiseksi. Tarttujasuunnittelulle luodaan pohjaa esittelemällä erilaisia olemassa olevia tarttujen teknologioita ja tarttujasuunnittelulle ominaisen suunnittelumetodologian piirteitä. Suunnittelutyö etenee konseptisuunnittelusta yksityiskohtaisempaan mekaniikkasuunnitteluun. Tarttujan toiminnalle muodostetaan vaihtoehtoisia toteutustapoja, joiden soveltuvuutta arvioidaan konstruktioiden jatkokehityksen ja simuloinnin avulla. Vaatimusten kartoittaminen on varsinkin projektin aluksi haastavaa, ja tarttujasuunnitteluprosessissa ilmenee koneensuunnittelulle ominaista iteratiivisuutta. Varioimalla konseptien ominaisuuksien lähtöarvoja ja toistamalla simulointia opitaan järjestelmän reunaehdoista ja ominaisuuksista.

Suunnitteluprosessin edetessä huomataan, että magneettitartunta on soveltuvin tarttuntaperiaate tarkastellussa sovelluksessa. Magneettitarttujaa käytettäessä tarttujan mukautuminen tarttuntapintaa vasten on onnistuneen ja hallitun tartunnan edellytys. Lisäksi kappaleiden satunnainen orientaatio edellyttää tarttujan mukautumista. Eräs työn osakokonaisuuksista on tarttujan mukautumismekanismien kehittäminen. Mukautumismekanismien toimintaperiaatteeksi valikoituu magneetin vapaa kellunta ja lukitseminen kiilakappaleiden ja pneumaattisen sylinterin avulla. Tehtyjen toimintaperiaatteiden valintojen pohjalta muodostetaan tarttujakonstruktio ja määritetään rakenteen mekaaniset kuormitukset, joiden avulla mitoitetaan tarttujan toimilaitteet ja muut koneenosat. Tarttujasta muodostetaan CAD – malli, ja rakenteessa esiintyviä jännityksiä ja siirtymiä simuloidaan elementtimenetelmää hyödyntämällä.

Suunnittelutyön jälkeen tarttujan komponenteista tehdään valmistus- ja kokoonpanopiirustukset. Komponentit valmistetaan ja hankitaan, jonka jälkeen tarttuja kokoonpannaan. Tarttujan toiminnallisuutta arvioidaan testaamalla, ja ilmenneitä tarttujan ominaisuuksien puutteita parannetaan korjaustoimenpiteillä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Automation Technology

LYYTINEN, JANNE: Design of an Adaptive Robot Gripper

Master of Science Thesis, 43 pages, 16 Appendix pages

April 2014

Major: Design of Machine Systems

Examiner: Professor Asko Ellman

Keywords: robotics, robot cell, adaptive gripper, magnetic gripper, gripping, gripper design, design process

Robot gripper is a common construction that requires design work during customized robotics delivery projects. Notable amount of variation between different gripper designs is apparent between different projects, because the customer workpiece is always the basis for the gripper design process. A wide variety of workpieces inevitably results in a wide variety of solution-specific grippers.

A gripper for a robot cell attached to an automotive industry component manufacturing system is designed in this thesis. The robot cell is introduced to define the design problem. Different gripper technologies and common characteristics of the gripper design process are described. The design work proceeds from conceptual design to a more detailed mechanical design. Alternative solutions for the gripping functionalities are formed, and the suitability of different options is evaluated through further design and simulation. Finding out the design requirements for the gripper is difficult in the beginning of the project and the design of the gripper is characterized by the iterative nature of machine design. By repeatedly studying the effects of variations in the concept properties, boundary conditions and properties of the system are learned.

Using a magnetic gripper is found out to be the most plausible gripping method during the design process. When a magnetic gripper is used, it is important for the gripper to adapt to the gripping surface to ensure a successful and controlled gripping. In addition the random orientations of the workpieces require gripper adaptation. One of the focuses of this thesis is to develop the adaptation mechanism for the gripper. Using key pieces and a pneumatic cylinder turn out to be functional solutions for the mechanism. A gripper construction is formed according to the choices made. Mechanical loads are defined and applicable sizes for the actuators and other components are calculated. A CAD – model of the gripper is formed and the stresses and strains of the construction are simulated using the finite element method.

After the design work is complete, manufacturing and assembly drawings are made for the gripper components. The components are manufactured and purchased and the gripper is assembled. Functionality of the gripper is evaluated by testing and the appeared deficiencies are improved by corrective actions.

ALKUSANAT

Tämä on Tampereen teknilliselle yliopistolle tehty diplomi-insinöörin tutkinnon diplomityö. Työ on laadittu automaatiotekniikan koulutusohjelmassa liittyen konejärjestelmien suunnittelun pääaineopintoihin.

Käytännön suunnittelutyössä voi kulkea montaa eri polkua kohti ratkaisua. Vaihtoehtoisista menetelmistä soveltuvimman valitseminen jää hektisessä ympäristössä omaksi henkilökohtaiseksi intuitiiviseksi valinnaksi. Työn tekeminen paitsi loi yritykselle tarvitun tarttujakonstruktion, lisäsi se myös henkilökohtaista suunnittelumetodologioiden ja päänsisäisten prosessien ymmärrystä luontaisen luovuuden ja intuition tehokkaammaksi hyödyntämiseksi ja ruokkimiseksi. Työn edetessä oli mielenkiintoista nähdä yksinkertaisten hahmotelmien ja hajanaisten ajatusten kasvavan yksityiskohtaiseksi toiminnalliseksi kokonaisuudeksi. Työn tekeminen vahvisti uskoa omaan kyvykkyyteeni toimia suunnittelutyön parissa.

Konstruktiota suunnitellessa suurena apuna olivat kollegat Harri Nuutinen ja Jussi Hiukka. Työn kirjoittamisen ohjaamisesta ansaitsee kiitokset professori Asko Ellman. Kiitos myös ystävilleni, sisaruksilleni, vanhemmilleni ja avovaimolleni Sarille tuesta ja ymmärryksestä siihen, että olen valinnut näinkin omituisen alan. Se oli vahinko. Niin kuin elämä yleensäkin.

Tampereella 4.4.2014

Janne Lyytinen

SISÄLLYS

1	Robottisovellus.....	1
1.1	FMS - järjestelmä.....	1
1.2	Robottisolu	2
1.2.1	Työkierto.....	2
1.2.2	Robotti	3
1.2.3	Vaihtolaippajärjestelmä	3
1.2.4	Työkappaleet.....	4
1.2.5	Bufferitaso	4
1.2.6	Työkaluteline	4
1.2.7	Laserskanneri	4
1.2.8	Kuljetin	5
1.2.9	Materiaaliasemat	5
1.2.10	Kuljetushäkit ja materiaalilavat	5
2	Tarttuvat.....	6
2.1	Tarttumatyyppit.....	6
2.1.1	Mekaaniset tarttumat.....	6
2.1.2	Invasiiviset tarttumat.....	8
2.1.3	Vakuumi- ja magneettitarttumat	8
2.1.4	Adhesiiviset tarttumat	9
2.1.5	Universaalit tarttumat	9
2.1.6	Erikoistarttumat	10
2.2	Tarttumasuunnittelu	10
2.2.1	Suunnitteluprosessin vaihtelu	11
3	Konseptisuunnittelu	12
3.1	Työkappaleanalyysi.....	12
3.2	Suunnittelun eteneminen	12
3.2.1	Myyntivaiheen tarttumatkonsepti	12
3.2.2	Konseptien kehitys.....	13
3.2.3	Vaatimuslista	15
3.2.4	Toiminnon abstrahointi.....	16
3.2.5	Toimintorakenne	17
3.2.6	Ratkaisuvaihtoehdot.....	18
3.3	Suunnittelun menetelmät.....	18
4	Mekaniikkasuunnittelu	20
4.1	Mekaniikkasuunnitteluprosessi	21
4.2	Tarttumatkonstruktio	21
4.2.1	Tarttuman pääkomponentit ja toimintaperiaate	21
4.2.2	Rungon muoto ja rakenne	22
4.2.3	Mukautumismekanismi.....	24
4.2.4	Pneumatiikkakaavio.....	25

4.3	Koneenosien mitoitus.....	26
4.3.1	Runko.....	26
4.3.2	Kestomagneetti	27
4.3.3	Pneumaattisen sylinterin ja paininvivun mitoitus.....	27
4.4	Törmäys- ja ulottuvuustarkastelu.....	31
4.5	Kuvien piirto ja PDM.....	31
4.6	Koordinaatisto	31
5	Tulokset ja niiden tarkastelu	33
5.1	Magneetin jousto.....	35
5.1.1	Jouston ääriarvot	35
5.2	Tarttujan testaus	37
5.3	Suunnitteluvirheet ja korjaukset.....	37
5.4	Käyttö tuotannossa	38
5.5	Kehitysehdotukset.....	38
6	Johtopäätökset.....	39
	Lähteet.....	41
	Liite 1: Yleinen suunnitteluprosessi.....	44
	Liite 2: Mathcad - laskelmat	45
	Liite 3: FEM - laskelmat	49

TERMIT, LYHENTEET JA MERKINNÄT

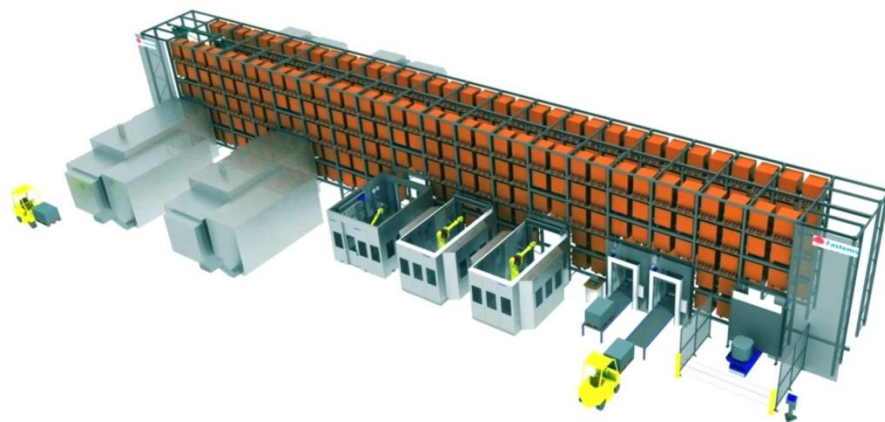
CAD – malli	Tietokoneen avulla muodostettu 3D – CAD (Computer-Aided Design) malli.
DXF	Yleinen CAD – ohjelmistojen tiedostomuoto
FMS	Flexible Manufacturing System. Joustava valmistusjärjestelmä, joka rakentuu automaattisen varastojärjestelmän ympärille kytketyistä koneista ja laitteista.
Pahl & Beitz	Gerhard Pahlin ja Wolfgang Beitzin kehittämä tuotekehitysoopin metodiikka.
PDM	PDM (Product Data Management) – järjestelmä on yrityksen tuotetietoa hallinnoiva ohjelmistoympäristö.
Singulariteetti	Ohjausongelmia aiheuttava robotin asento, jossa kaksi tai useampi robotin akseleista ovat samalla suoralla.
A, B, C	Tukipisteet
A_x, A_y	Tukipisteen A tukivoiman x - ja y - suuntaiset komponentit
A_s	Sylinterin poikkileikkauksen pinta-ala
α_F	Voiman F kulma x – akselin suhteen
$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$	Magneetin kiertymät x -, y - ja z -akselien ympäri
B_y	Tukipisteen B tukivoiman y - suuntainen komponentti
d	Sylinterin halkaisija
d_Q	Voiman F_Q etäisyys pisteestä Q
F	Sylinterin aikaansaama voima
F_{kr}	Kriittinen kuormitus
F_Q	Momentin M_Q aiheuttava voima
F_{sall}	Sallittava kuormitus
F_x, F_y	Voiman F x - ja y - suuntaiset komponentit
G_1	Käsiteltävän kappaleen painovoima
M_Q	Kappaleeseen vaikuttavien momenttien resultantti
n	Varmuusluku
p	Sylinterissä vaikuttava paine
Q	Mielivaltainen piste, johon momentti M_Q kohdistuu
R_x	Voimaresultantti, johon on summattu x - akselin suuntaisesti vaikuttavat voimat
R_y	Voimaresultantti, johon on summattu y - akselin suuntaisesti vaikuttavat voimat
s_1, s_2, s_3, s_4	Paininvivun geometriset mitat
s_x, s_y, s_z	Magneetin siirtymät x -, y - ja z -akselien suuntaisesti

1 ROBOTTISOVELLUS

Tarttujasuunnittelu on eräs oleellinen osakokonaisuus ja usein toistuva suunnittelukohde robotiikan toimitusprojekteissa. Tämän työn tavoitteena on luoda robotin tarttujakonstruktio robottisoluun hyödyntämällä olemassa olevia tarttujatyyppejä, koneensuunnittelun oppeja, tuotekehitysmetodologioita ja intuitiivista ajattelua. Työ esittelee yleisimpiä tartuntamenetelmiä ja kuvaa tarttujan suunnitteluprosessia edeten aina lähtötietojen hankinnasta valmiiksi toiminnalliseksi konstruktioksi asti. Työssä muodostetaan ensin robottisolun tarttujan konsepti, jonka pohjalta kehitetään ja mitoitetaan yksityiskohtainen ja suunnittelultaan valmis tarttuja. Työ vastaa kysymykseen, millä keinoin suunnitteluprosessin eri vaiheissa edetään, ja selventää käytännön suunnittelutyön edellytyksiä. Työn tuloksia arvioidaan suunnittelutyön toteutumisen ja suunnitelmien pohjalta kokoonpannun ja testatun tarttujan toiminnallisuuden valossa.

1.1 FMS - järjestelmä

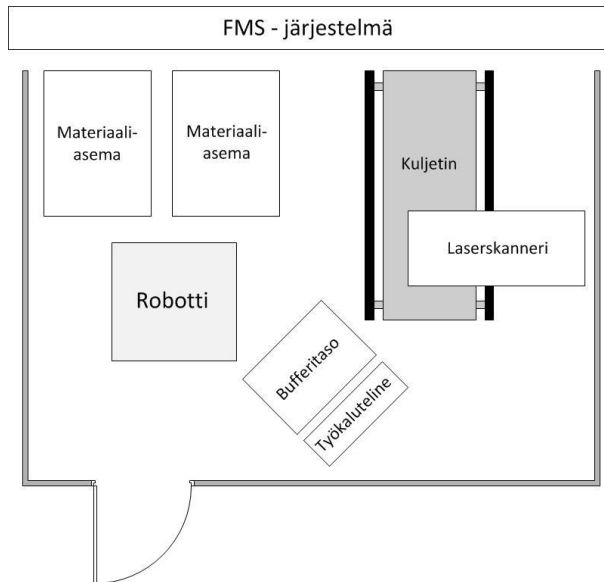
Työn toimintaympäristönä on robottisovellus, joka on kytköksissä FMS (Flexible Manufacturing System) - järjestelmään. FMS – järjestelmällä tarkoitetaan valmistusjärjestelmää, joka rakentuu automaattisen varastohissijärjestelmän ympärille kytketyistä koneista ja laitteista. Järjestelmästä on esitetty esimerkki alla. Tarttujan suunnittelutyö toteutettiin osana Fastems Oy Ab:n laajempaa ajoneuvoteollisuuden toimitusprojektia, johon sisältyi FMS - järjestelmä ja useita erilaisia robottisoluja. Salassapitosopimuksen ja opinnäytetöiden julkisuuden vuoksi on tiettyjä järjestelmän osakokonaisuuksia ja toimintoja esitetty tässä työssä vain yleisellä tasolla.



Kuva 1-1 Esimerkki FMS – järjestelmästä, johon on integroitu robottisoluja (Fastems 2013)

1.2 Robottisolu

Kyseessä oleva robottisolu on tyypiltään materiaalinsyöttösolu. Sen päätoimintona on poimia kappaleet järjestelmään syötettävistä kuljetushäkeistä ja paletoida ne järjestelmässä kulkeville materiaalilavoille. Kappaleiden paikka ja asento kuljetushäkeissä tunnistetaan solussa olevan kiinteän 3D – laserskannerin avulla.



Kuva 1-2 Periaatteellinen kuva robottisolun layoutista ja sen pääkomponenteista

Yllä olevassa kuvassa on esitetty robottisolun pääkomponentit. FMS – järjestelmän hissi tuo haarukoillaan kuljetushäkkejä ketjukuljettimelle ja materiaalilavoja materiaaliasemille. Skannerin laseryksikkö sijaitsee kuljettimen yläpuolella. Lisäksi solussa on bufferitaso työkappaleille ja työkaluteline, jossa robotti kykenee vaihtamaan käytettäviä työkaluja ja tarttuvia. Suunnittelun kohteena olevalla tarttujalla nostetaan kappaleita kuljetushäkistä bufferitasolle.

FMS – järjestelmässä on erikseen ns. autoloading – solut, joissa kappaleet edelleen ladataan materiaalilavoilta järjestelmän työstökoneille kulkeviin konepaletteihin. Lisäksi järjestelmään liittyy robottisoluja, joissa ladataan kappaleita suoraan materiaalilavoilta työstökoneiden kiinnittimiin.

1.2.1 Työkierto

Robottisolun työkierto on periaatteeltaan seuraava:

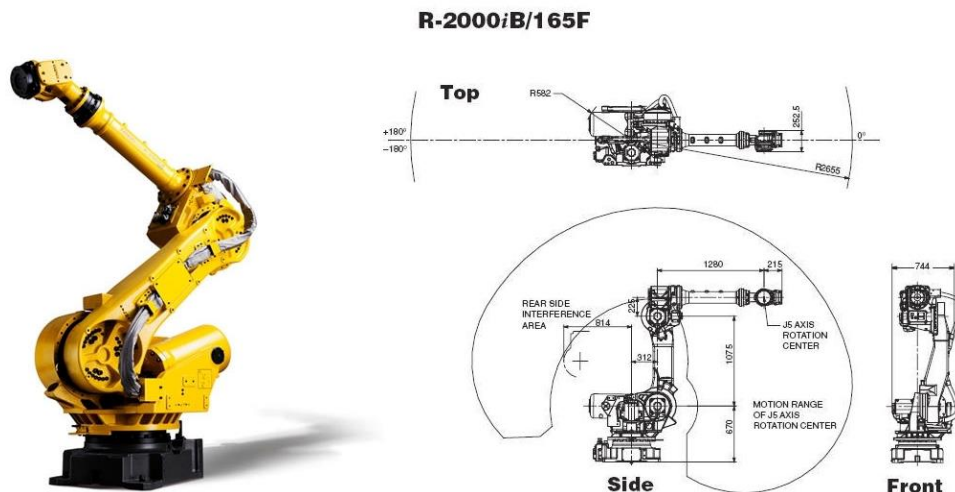
- Ensimmäisellä työkierrolla kuljetushäkki syötetään soluun ja kuljetetaan skannausasemaan.
- Järjestelmä skannaa kuljetushäkin ja määrittää kappaleiden asennot.
- Jos kuljetushäkki on tyhjä tai hyväksyttäviä kappaleiden orientaatioita ei löydy, se palautetaan FMS – järjestelmään. Häkki, jossa on kappaleita ja josta ei löydy yhtään soveltuvaa tartunta-asentoa, palautetaan järjestelmään virhetilaisena.

Operaattori voi kutsua tällaisen kuljetushäkin erilliseen latausasemaan, jossa kappaleiden orientaatiota voidaan korjata.

- Kappaleiden asentojen avulla määritetään tartunta-asennot
- Robotti vaihtaa tarttujan, poimii kappaleen ja laskee sen bufferipöydälle
- Kappale kuvataan ja punnitaan
- Robotti vaihtaa tarttujaa ja siirtää kappaleen materiaalilavalle

1.2.2 Robotti

Robottisovelluksessa käytetty robotti on kuusiakselinen teollisuusrobotti Fanuc R-2000iB/165F. Robotin suurimman sallitun käsiteltävän massan suuruus on 165 kg, sen maksimiulottuvuus on 2665 mm ja sen toistotarkkuus on $\pm 0,2$ mm. (Fanuc 2014) Kuusiakselisen robotin maksimiulottuvuudella tarkoitetaan tässä etäisyyttä, johon robotin viidennen akselin rotaatiokeskiöllä ulotutaan. Maksimiulottuvuus ja robotin nivelten dimensiot rajaavat robotille työalueen, jolla se voi toimia. Sovelluksen robotti ja sen työalue on kuvattu alla.



Kuva 1-3 Fanuc R-2000iB/165F – teollisuusrobotti ja sen työalue (Direct Industry 2014, RobotWorx 2014)

1.2.3 Vaihtolaippajärjestelmä

Robotti kytkeytyy solun tarttujiin ja työkaluihin vaihtolaippajärjestelmän avulla. Järjestelmä mahdollistaa tarttujen automaattisen vaihdon. Robottiin ja tarttujiin kiinnitetään pneumaattisesti toisiinsa lukittavat laipat, joista on esitetty kuvassa 1-4 esimerkkinä Schunk SWS – sarjan vaihtolaipat. Laipan läpi kulkee tarttujaan ohjausventtiilien paineilmalinjat sekä sähköliitännät tarttujen anturointia varten.



Kuva 1-4 Schunk SWS - vaihtolaippajärjestelmä (Schunk 2014)

1.2.4 Työkappaleet

Suunniteltavan tarttujan käsittelemät kappaleet ovat geometrialtaan epäsymmetrisiä valukappaleita, joihin tehdään koneistuksia muissa FMS – järjestelmään liitetyissä robotisoluissa, jotka palvelevat työstökoneita. Lisäksi koneistuksia tehdään järjestelmään suoraan kytketyissä työstökoneissa. Erilaisia kappaleita on yhteensä neljä, joissa kaikissa on yhteisiä piirteitä. Kappaleita on kahta erilaista tyyppiä. Eri tyyppeihin sisältyy kappaleiden vasen- ja oikeakätiset versiot. Kappaleiden materiaali on valuteräs. Työkappaleiden maksimimassa on 45 kg.

1.2.5 Bufferitaso

Kappaleet nostetaan kuljetushäkeistä ja lasketaan bufferitasolle, jossa kappaleet kuvataan robotin käsivarteen kiinnitetyllä kameralla seuraavan vaiheen tartuntaa varten ja punnitaan laadunvarmistuksen vuoksi. Bufferitaso on teollisuusvaa'an päälle kiinnitetty pöytämainen rakenne, jonka pintamateriaalina on musta kumimatto, joka helpottaa kappaleiden piirteiden tunnistamista konenäön avulla.

1.2.6 Työkaluteline

Robotin tarttijat ja työkalut säilytetään työkalutelineessä. Tarttujen ja työkalujen laipoissa on geometriset muodot, joiden avulla ne asemoituvat tarkasti työkalutelineeseen. Tarttujen vaihto tapahtuu automaattisesti.

1.2.7 Laserskanneri

Kuljetushäkissä olevat kappaleet kuvataan 3D – skannerilla. Skanneri on pylvään päähän asetettu viivalaser, joka kuvaustilanteessa pyyhkäisee laserilla kuljetushäkin yli. Skannausdataan sovitetaan työkappaleiden CAD - malleja. Datasta saatuihin kappalei-

den asentoihin sovitetaan määriteltäviä tartunta-asentoja, joista hyväksyttävien asentojen koordinaatit asetetaan robotin tartuntapisteeksi.

1.2.8 Kuljetin

Kuljetushäkkejä liikutetaan robottisolun ketjukuljettimella. FMS – järjestelmän hissi tuo työkappaleilla ladottuja kuljetushäkkejä kuljettimen järjestelmän puoleiseen päähän, josta ne siirretään kuljettimella kuvattavaksi ja robotin käsiteltäväksi laserskannerin alle.

1.2.9 Materiaaliasemat

Solun materiaaliasemat ovat runkorakenteita, jotka on muotoiltu niin, että FMS – järjestelmän hissi pystyy tuomaan niihin materiaalilavoja. Materiaaliasemissa on ohjaimet materiaalilavojen paikoitukseen.

1.2.10 Kuljetushäkit ja materiaalilavat

Soluun syötettävät kuljetushäkit ovat verkkoaitaisia ns. gitterboxeja, joiden standardoitu leveys on 835 mm, pituus 1240 mm ja korkeus 970 mm. Työkappaleet ladotaan valimolla häkkeihin kerroksittain, mutta ne voivat kuljetuksen aikana liikkua. Työkappaleet nostetaan tarttujalla kuljettimen päällä liikkuvista häkeistä ja siirretään bufferitasolle. Tasolta kappaleet siirretään solun muilla tarttujilla materiaaliasemaan FMS – järjestelmän hissien tuomille muovisille EUR – lavoille, joilla kappaleet poistuvat solusta. Lavojen leveys on 800 mm, pituus 1200 mm ja korkeus 144 mm. Kuljetushäkki ja EUR – lava on kuvattu alla.



Kuva 1-5 Kuljetushäkki ja EUR – lava (Wikipedia 2014. Gitterbox, TranspacEurope Ltd 2014)

2 TARTTUJAT

Olemassa olevien teknologioiden tuntemus on edellytys järkevien suunnitteluvalintojen tekemiselle. Tässä luvussa kuvataan yleisimpiä robotiikan tarttujatyyppejä ja tartunta-menetelmiä tarttujan konseptisuunnittelun pohjaksi.

Tarttijat ovat robotin toimilaitteita, joiden avulla robotit vuorovaikuttavat ympäristöönsä. Tällaisia toimilaitteita kutsutaan myös manipulaattoreiksi, ja ne sijaitsevat robotin kinemaattisessa ketjussa viimeisenä. (Wikipedia. 2014. Robot end effector) Tarttujen lisäksi manipulaattoreita voivat olla erilaiset sovelluskohtaiset työkalut. Sekä manuaalisesti että automaattisesti käytettäviä perinteisiä työkaluja voidaan soveltaa robotin työkaluiksi tai tarttujiksi. Usein tällaisissa sovelluksissa tarvitaan työkaluun jouston sallivan ominaisuuden kehittämistä käsiteltävänä olevan kappaleen epätarkkuuksien ja vaihteluiden sekä robotin oman toistotarkkuuden vuoksi. (Lhote et al. 1984, s.297) Robotin työkalut voivat myös joissain sovelluksissa olla irrallisia järjestelmiä, jotka robotti ottaa tarttujalla käyttöönsä.

Moderneihin useita tarttujia ja työkaluja sisältäviin robottisovelluksiin liittyy usein myös automaattinen tarttujanvaihtojärjestelmä. Manipulaattorit kytkeytyvät robottiin lukittavien laippojen avulla, ja työkalut ja tarttijat varastoidaan työkaluasemaan, jossa robotti voi automaattisesti vaihtaa käytettävää manipulaattoria.

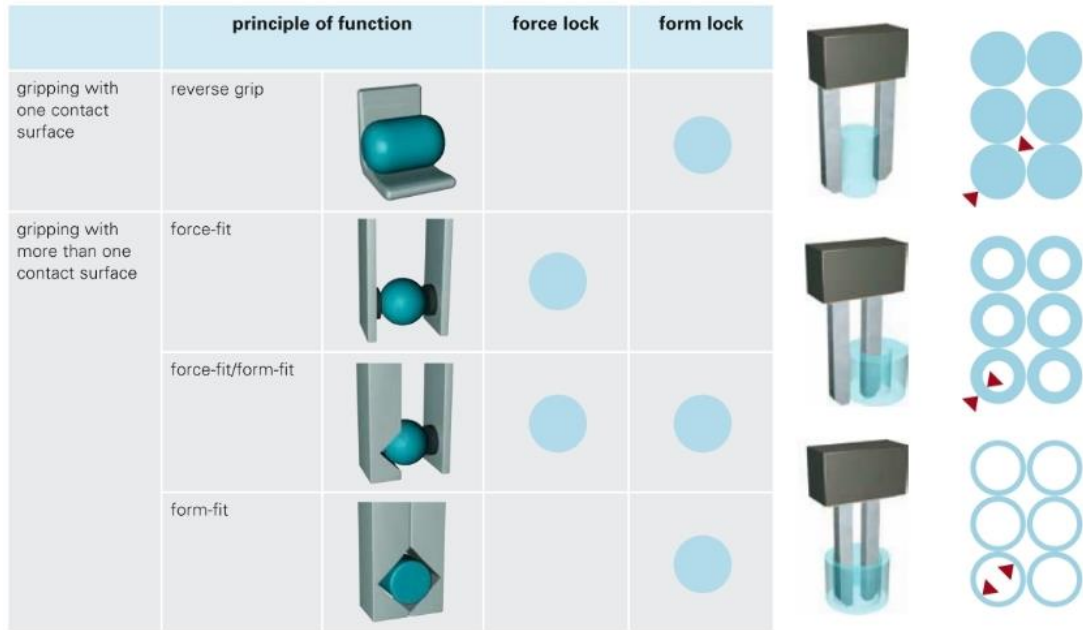
Tarttujan tulee tavanomaisissa tapauksissa pystyä tarttumaan työkappaleeseen, paikoittamaan kappale, säilyttämään kappaleen orientaatio siirron aikana ja vapauttamaan kappale.

2.1 Tarttujatyypit

Tarttijat voidaan jaotella niiden toimintatavan mukaan mekaanisiin tarttujiin, invasiivisiin tarttujiin, vakuumi- ja magneettitarttujiin, adhesiivisiin tarttujiin ja universaaleihin tarttujiin, joita ovat mm. erilaiset muotoon mukautuvat ja ihmisen kättä muistuttavat tarttijat. Sovelluskohtaisesti voidaan suunnitella myös erikoistarttujia.

2.1.1 Mekaaniset tarttijat

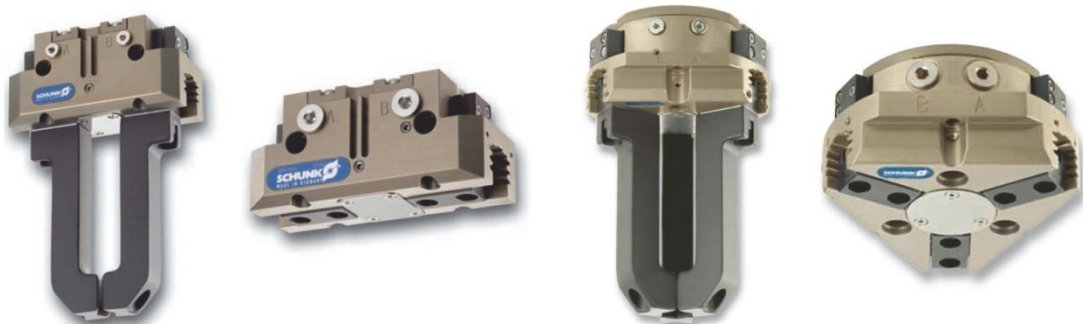
Mekaaninen tartunta perustuu kappaleen kosketukseen ja siihen tarttumiseen leukojen tai paisuvan tarttujaelementin avulla. Paisuvat tarttijat voivat olla esimerkiksi kappaleen sisälle asetettavia kumisia täytettäviä tartuntatappeja. Työkappaleeseen voidaan tarttua muotosulkeisesti, kitkan avulla tai hyödyntämällä kappaleen omaa massaa niin että kappale pysyy tarttujassa pelkän painovoiman avulla. Mekaaninen tartuntaote voi olla ulkoinen tai sisäpuolinen. Tartuntatapoja on kuvattu kuvassa 2-1.



Kuva 2-1 Mekaanisia tartuntatapoja (Wolf et al. 2005 mukaan)

2.1.1.1 Leukatarttujat

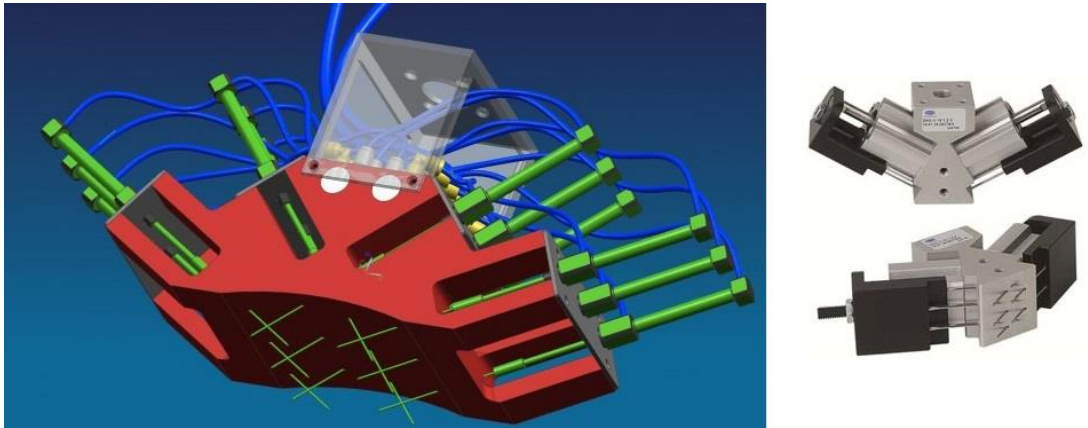
Mekaanisista leukatarttujista yleisimpiä ovat kaksi- ja kolmisormitarttujat, joista on esitetty esimerkit alla. Kyseisillä tarttujilla pystytään kattamaan suurin osa teollisuusrobotiikan tartuntatapauksista. Useampisormisia tarttuita käytetään lähinnä erikoissovelluksissa. Tartuntamekanismeja on laaja kirjo ja tartuntavoimia voidaan välittää mm. hammaspyörillä ja – tangoilla, nokka-akseleilla, kiiloilla ja liikeruuveilla. Nykyisin on saatavilla eri valmistajien tarttujaelementtejä, jotka ovat tavanomaisesti pneumaattisia tai sähkökäyttöisiä, ja joissa tarttujien sormet voivat liikkua joko vastakkaisilla rotaatioliikkeillä tai lineaariliikkeillä. Mekaanisiin tarttuihin voidaan integroida pyörityslieke tai jousimekanismi, jonka voima sovelluksesta riippuen suuntautuu joko leukojen avaamiseen tai sulkemiseen. Tarttujan leukojen muodon suunnittelu ja niiden materiaalivalinta tehdään sovelluskohtaisesti. (Monkman et al. 2004, Wolf et al. 2005)



Kuva 2-2 Schunkin pneumaattiset kaksisormiset PGN-plus ja kolmisormiset PZN-plus -tarttujaelementit (Schunk 2010)

2.1.2 Invasiiviset tarttujat

Invasiiviset tarttujat lävistävät kappaleen tartuntapinnan ja tunkeutuvat kappaleen sisään esimerkiksi neuloilla. Tällaisia tarttujia käytetään yleisesti tekstiilien ja pahvien käsittelyssä. (Monkman et al. 2004) Esimerkkeinä invasiivisesta tarttujasta on alla kuvattu SINTEF Raufoss Manufacturingin neulatarttujan konseptin CAD - malli ja kaupallinen Schmalzin valmistama neulatarttuja.



Kuva 2-3 Invasiiviset neulatarttujat (Robotnor 2014, Pneumatics Online 2014)

2.1.3 Vakuumi- ja magneettitarttujat

Vakuumi- ja magneettitarttujilla tartuntavoima välitetään imukuppien ja magneettien avulla. Vakuumisovelluksissa voidaan käyttää yhtä tai useampaa imukuppia ja niitä käytetään usein tasaisten ja sileäpintaisten kappaleiden käsittelyyn. Magneettitarttujissa voidaan käyttää kesto- tai sähkömagneetteja ja niillä tartutaan rautapitoisiin kappaleisiin. Jäännösmagnetismi voi tällaisissa sovelluksissa olla ongelma. Magneetin tartuntapinta voi olla tasainen tai tartuntapinnan muotoa mukaileva. Vakuumi – ja magneettitarttujista on esitetty esimerkit alla. (Pham et al. 1986)



Kuva 2-4 Vakuumitarttuja ja magneettitarttuja (Liftrite 2014, Robotiq 2014)

2.1.4 Adhesiiviset tarttujat

Adhesiivisten tarttujen toiminta perustuu niiden takertumiseen tartuntapintaa vasten. Adhesiivisessa tarttussa voidaan hyödyntää esimerkiksi liimapintaa, pintajännitystä, jäätymistä, sähkökenttiä tai Van der Waalsin voimaa. (Monkman et al. 2004) Alla on kuvattu sähkökenttiin perustuva Altius Space Machinesin kehittämä tarttuja ja Stanfordin yliopiston suunnittelema Van der Waalsin voimaa hyödyntävän seinillä kiipeävän gekkomaisen Stickybot - robotin jalkojen tarttumat.



Kuva 2-5 Sähkökenttiin perustuva tarttuja ja Van der Waalsin voimaa hyödyntävä Stickybot (Popular Science 2014, Red Orbit 2014)

2.1.5 Universaalit tarttumat

Universaali yleispätevä tarttuja on ollut monen eri tahon kehitystyön kohteena. Ihmisen käden, jossa on 32 vapausastetta ja tuhansia paikka-, voima- ja lämpötilasensoreita, mallintaminen on tällaisessa kehitystyössä ollut looginen lähtökohta. Muita käytettyjä menetelmiä useanivelisten sormien lisäksi ovat mm. ilmalla täytettävät kumitaskut, jotka mukautuvat kappaleen muotoon, käärmemäisesti kappaleen pintaan mukautuvat vaijeiden ja vetopyörien muodostamalla mekanismilla liikutettavat sormet sekä muovautuvista polymeereistä valmistetut sormet. Nykyiset universaalit tarttumat ovat yleensä kalliita, joten yksittäisiä tehtäviä varten suunnitellaan tavallisesti sovelluskohtaisia tarttumat. (Pham et al. 1986, Lhote et al. 1984) Seuraavalla sivulla on esimerkkeinä universaaleista tarttuista kuvattu Schunkin kappaleen muotoon mukautuva neulatarttuja, NASA:n kehittämä Robonaut - projektin ihmisen kättä muistuttava manipulaattori ja Cornellin ja Chicagon yliopistoiden sekä iRobot - yhtiön yhteistyönä kehittämä universaali tarttuja, joka perustuu rakeilla täytetyn joustavan kumipallon jäykistämiseen tyhjiön avulla.



Kuva 2-6 Schunk universaali neulatarttuja, NASA Robonaut manipulaattori ja raepallo-tarttuja (Wolf et al. 2005, Diftler 2010, Cornell Creative Machines Lab 2014)

2.1.6 Erikoistarttijat

Erikoistarttujia suunnitellaan sovelluskohteisiin, joissa toimintaympäristö tai tartuntakohde luo tarttujalle erityisvaatimuksia. Tällaisissa sovelluksissa voidaan käyttää käytännössä mitä tahansa olemassa olevia tarttujaelementtejä, toimilaitteita ja mekanisme. Erikoistarttijat ovat edellä mainittujen tartuntamenetelmien yhdistelmiä ja muunnelmia. Esimerkkinä erikoistarttujasta on alla kuvattu ISO Groepin kehittämä taimia robotisoidussa kasvihuoneessa käsittelevä tarttujakokonaisuus, joka perustuu kaksisormiselle tartuntamekanismille.



Kuva 2-7 Taimia käsittelevä tarttujakokonaisuus robotisoidussa kasvihuoneessa (Wolf et al. 2005)

2.2 Tarttujasuunnittelu

Tartuntaan vaikuttavat ympäristön olosuhteet, työkappaleen ominaisuudet sekä työkalupaleen paikka ja orientaatio poimittaessa ja laskettaessa kappaletta. Tarttujen monimuotoisuus aiheutuu työkalupaleiden monimuotoisuudesta, koska työkalupale on aina tarttujasuunnittelun lähtökohta. Työkalupaleen analysointi ennen suunnittelua on tärkeää, ja työkalupaleesta tulisi määrittää sekä sen ominaisuudet että käyttäytyminen. Ominaisuuk-

sia ovat mm. kappaleen geometrinen muoto, materiaali, pinnanlaatu, lämpötila, massa ja massakeskipisteen sijainti. Kappaleen käyttäytymistä arvioitaessa kiinnitetään huomiota sen stabiileihin ja toivottuihin orientaatioihin, pinottavuuteen ja mahdollisiin paletointikuvioihin sekä kappaleen vierimiseen ja luistamiseen. Tärkeitä piirteitä tartunnan kannalta voivat olla hyvin yksityiskohtaiset asiat kuten kappaleen yksittäiset jäysteet ja kierteet. Huomioitava on myös materiaalin rajoitukset pintoihin kohdistuvien voimien suhteen. Toisin sanoen on määritettävä, mitä pintoja voidaan käyttää kappaleeseen tarttumiseen vaurioittamatta kappaletta. (Monkman et al. 2004)

Tarttujien tarjooman standardointi on robotiikan alalla toimivien yritysten tavoitteena. Yksinkertaisten samankaltaisten kappaleiden käsittelyyn voidaan käyttää samankaltaisia tarttuvia, joista muokataan pelkästään esimerkiksi leukoja, mutta monimutkaisempien kappaleiden tartunta voi edellyttää täysin uusien sovelluskohtaisten tarttujien suunnittelua. Työkappaleiden vaihtelu vaikeuttaa tarttujamallien standardointia, koska on huomioitava, että pienetkin muutokset sovelluskohteessa voivat suunnittelussa aiheuttaa isoja muutoksia tarttujakonstruktion.

2.2.1 Suunnitteluprosessin vaihtelu

Tarttujasuunnittelu on luonteeltaan iteratiivista eli sisältää toistuvaa suunnittelutyötä, jonka avulla suunnittelun kohteena olevan tarttujan ominaisuuksia määritetään. Iteratiivisuuden vuoksi suunnitteluprosessia on vaikea rationalisoida, ja prosessin sisältö vaihtelee projekteittain. Suunnitteluprosessien vaihteluun ja epäsystemaattisuuteen vaikuttavat seuraavat syyt. (Parnas et al. 1986 mukaan)

- Asiakkaat, joille suunnittelua tehdään, eivät tiedä mitä haluavat eivätkä osaa kertoa kaikkea tarvittavaa.
- Tarvittavaa tietoa ja yksityiskohtia paljastuu vasta kun suunnittelutyössä edetään tarpeeksi pitkälle.
- Suunnittelijat eivät osaa ottaa huomioon kaikkien järjestelmän ominaisuuksien vaikutuksia tai arvioida, mitä kaikkea suunnittelussa tulisi ottaa huomioon.
- Suunnitteluprojektit voivat muuttua ulkoisten syiden vaikutuksista.
- Ihmiset tekevät virheitä.
- Ihmiset suosivat tiettyjä ratkaisuja henkilökohtaisista syistä.
- Suunnittelussa hyödynnetään vanhoja designeja, joissa on tarpeettomia ominaisuuksia.
- Nykyisestä suunnittelukohteesta voidaan suunnitella tulevien projektien kannalta yleishyödyllisempää kokonaisuutta kuin mitä alkuperäiset nykykohteen vaatimukset edellyttäisivät

3 KONSEPTISUUNNITTELU

Tarttujan konseptisuunnittelua on vaikea jaotella selkeisiin vaiheisiin tai kuvata erityisen rakenteellisesti, koska käytännössä konseptivaiheessa tehdään useampia suunnittelumetodologioiden vaiheita samanaikaisesti. Suunnittelussa voidaan myös palata aiempiin vaiheisiin tai edetä osakokonaisuuksien tai konseptien yksityiskohtaisempaan mekaniikkasuunnitteluun niiden toimivuuden arvioimiseksi.

Kokeilemalla suunnittelussa erilaisia vaihtoehtoisia konsepteja suunnittelun kohteena olevasta järjestelmästä opitaan ominaisuuksia ja reunaehtoja. Tarttujasuunnitteluprosessia kuvaa ehkä parhaiten dynaaminen säätöjärjestelmää muistuttava oppimisprosessi, jossa tiedon takaisinkytkennän avulla toistetaan suunnittelua, kunnes tiedon määrä on riittävä ja optimaalisen ratkaisun löytäminen on mahdollista. Oppimisprosessi lisää tiedon määrää ja helpottaa ratkaisujen etsimistä. (Pahl et al. 2007, s.14) Oppimisprosessi muistuttaa luonteeltaan ns. informaatiomuunnosta, jossa tietoa vastaanotetaan, prosessoidaan ja välitetään iteratiivisessa prosessissa. Prosessin eri vaiheita toistetaan ja uusi prosessilla saatu tieto perustuu aina edellisen toiston tuloksille. Tiedon määrä ja yksityiskohtaisuus kasvaa jokaisella toistetulla kierroksella.

3.1 Työkappaleanalyysi

Kappaleen geometria ja asento kuljetushäkissä ovat robottisovelluksen tarttujasuunnittelun lähtökohtia. Kappaleen tasapainotiloja ja pinoutumista tutkitaan sekä mallien että fyysisten työkappaleiden avulla. Työkappaleesta määritetään mahdolliset tartuntapisteet erilaisille tarttujatyypeille. Koska kyseessä on valukappale, valupurseiden sijainnilla on vaikutusta tartuntaan. Valupurseiden käyttöä tartunnassa tulee välttää, ja usein tarttijat suunnitellaan väistämään ne, koska niiden sijainti on epämääräinen ja tämä aiheuttaa ongelmia kappaleen laskemisessa.

3.2 Suunnittelun eteneminen

Yleisiä suunnittelutyöhön sisältyviä vaiheita ovat tavoitteenmäärittely, reunaehtojen ja alkutilanteen selvennys, ennakkoluuloista luopuminen, vaihtoehtojen etsintä, arviointi ja päätöksenteko. Ajattelua pyritään yleensä ohjaamaan diskursiivisemmaksi sammuttamalla intuitiivisen ajattelun luovuutta.

3.2.1 Myyntivaiheen tarttujakonsepti

Tarttujan suunnittelussa lähdettiin liikkeelle robottisolun myyntivaiheen konseptista. Myyntivaiheessa tartuntakonseptina oli työkappaleen onkaloihin laskettava harp-

puunamainen tappi, jossa on sivulle avautuvat piikit. Tapilla oli tarkoitus käsitellä kaikkia soluun syötettäviä kappaleita. Kappaleen laskeminen hallitusti tarkkaan asemaan osoittautui mahdottomaksi epävakaan otteen ja tuntemattoman kappaleen asennon vuoksi. Tuntematon asento voitaisiin hyväksyä, jos kappaleet olisi mahdollista pudottaa bufferipöydälle tarpeeksi korkealta, jolloin robotilla ei olisi törmäysriskiä. Tämä oli kuitenkin mahdotonta kappaleiden painon vuoksi. Pudottamisesta aiheutuisi bufferin rikkoutumisriski ja kappaleiden hallitsematonta sinkoutumista. Lisäksi tarttujan irrottaminen kappaleesta arvioitiin ongelmalliseksi.

”Hienon idean mahdottomuudet alkavat paljastua vasta, kun siitä tehdään tarkkoja laskelmia ja piirroksia. Kun yksi väylä ei onnistu, varalla on ideoita vaihtoehtoiksi” (Reunanen 2001, s.119) Tarttujakonseptille alettiin etsiä uutta ratkaisua, ja konseptin vaatimuslistaan muodostui seuraavat vaatimukset; kappaletta laskettaessa on kappaleen oltava kiinteästi lukittuna tarttujaan ja kappaleen asennon tarttujassa on oltava tarpeeksi tunnettu.

3.2.2 Konseptien kehitys

Suunnittelun avuksi tutkittiin yrityksen aiempien toimitusprojektien tarttujia ja niiden soveltuvuutta kyseiseen sovellukseen. Vaikka yrityksellä on pitkä historia erilaisten tarttujakonstruktioiden luonnissa, olemassa olevista tarttujista ei löytynyt erityisen soveltuvaa designia kyseiseen sovelluskohteeseen. Tarttujasuunnittelun aikana havaitaan helposti sovelluskohteessa joitakin reunaehtoja, joihin valmiit konstruktiot eivät sovellu ja konstruktioita tulee muokata. Asiakkaiden työkappaleet vaihtelevat huomattavasti, ja tämä peilautuu väistämättä tarttujasuunnitteluun tarttujakonstruktioiden vaihteluna. Kyseisen sovelluskohteen tartunnan kohteena oleva kappale on geometrialtaan tavanomaisista monimutkaisempi, ja kappaleen epäsymmetrisyys asettaa tartunnalle omat erityiset vaatimuksensa. Lisäksi kappaleiden kuljetushäkit ja skannerin käyttö asettivat tarttujalle reunaehtoja, jotka vaikeuttivat valmiiden jo olemassa olevien suunnitelmien hyödyntämistä.

Tarttujakonseptia alettiin kehittää käyttämättä pohjana valmiita suunnitelmia, mikä on suunnitteluinsinöörin näkökulmasta mielenkiintoista, mutta toimitusprojektin kannattavuuden kannalta haitallista. Tarttujakonseptin ratkaisun luonnissa lähdettiin liikkeelle perustavanlaatuisista malleista ja kokeiltiin erilaisia konsepteja, joiden avulla opittiin tarttujan ominaisuuksia. ”Tehtävä on aluksi kuin monoliitti. Se on määreetön, joka on analysoitava alkutekijöihinsä” (Reunanen 2001, s.125) Suunnittelun alku on luonteeltaan itseohjautuvaa useiden konseptien luontia, simulointia, arviointia ja kehittämistä samanaikaisesti. Esi-ideointia tehdään sekavassa sumuisia ja utuisia ajatuksia sisältävässä kaoottisessa alkutilanteessa, josta käytetään nimitystä fuzzy - front. ”Ajatus on vielä ikään kuin solmussa, mutta langanpää on jo näkyvässä.” (Reunanen 2001, s.19) Syntynyt alkuidea ohjaa konseptin kehittelyä. Ajattelun luonnoksista valitaan ns. johtoidea, joka jäsentää ja ohjaa suunnittelua. Uusi periaate avautuu ja eriytyy, organismi jäsentyy orgaaneihin, joita kehitellään erikseen ongelmaorientoituneesti ja kokoonpannaan systeemiksi. (Reunanen 2001, s.111)

Seuraavana projektissa tutkittavaksi tartuntakonseptiksi valittiin mekaaninen leuka-tarttuja, mikä oli looginen seuraava askel leukatarttujen yleispätevyyden vuoksi. Tarttu-jaksi valittiin kokoluokaltaan maksimimassaiselle kappaleelle soveltuva kaksisorminen tarttujaelementti. Ulkopuolinen mekaaninen leukatarttuja osoittautui nopeasti toimimat-tomaksi vaihtoehdoksi, koska kappaleet voivat olla kiinni kuljetushäkin seinämissä, jolloin ulkopuolinen tartunta ei onnistu. Tästä opittiin tarttujan vaatimus: tarttujan on kyettävä tarttumaan kuljetushäkin seinämissä kiinni oleviin kappaleisiin. Seuraavaksi tutkittiin mekaanista leukatarttujaa sisäpuolisella otteella, jonka konseptin jatkosuunnit-telu vietii kohtuullisen pitkälle ennen kuin havaittiin, että käytettäessä leukatarttujaa kappaleen tartuntapintojen epäsymmetrisyyden vuoksi kappaleesta ei saa symmetristä ja samanaikaisesti tarpeeksi tukevaa muotosuljettua otetta. Pelkän kitkan käyttäminen tar-tuntaan oli poissuljettu vaihtoehto, koska tartuntapinnat ovat kaltevia ja kappale olisi pudonnut tarttujasta. Tartuntapintojen epäsymmetrisyydestä aiheutui, että kaikkia kulje-tushäkin mahdollisia kappaleen paikkoja ei mekaanisella tarttujalla pystytty kattamaan. Tästä muodostui jälleen uusi vaatimus: tarttujan otteen on oltava symmetrinen

Symmetrisyysvaatimuksen myötä kappaleesta etsittiin symmetrisiä tartuntamahdol-lisuuksia. Soveltuvalta vaikuttavaksi symmetrisen tartunnan mahdollistavaksi konse-ptiksi osoittautui magneettitartunnan käyttö. Muuten epäsymmetrisistä kappaleista löytyi yksi yhteinen tasomainen piirre, jossa ei esiintynyt valupurseita ja jossa kappaleen pak-suus oli riittävä magneettitarttujan käyttöön. Magneetilla tarttumista simuloitiin karkei-den tarttujahahmotelmien avulla, ja konsepti vaikutti toimivalta. Magneetin on oltava tiiviisti kiinni tartuntapinnassa, että tartunta onnistuu. Koska tartuttavat kappaleet ovat valukappaleita, niissä on ulkogeometrioiden vaihtelua. Jotta tartunta olisi onnistunut, täytyy tarttujan huomioida kappaleiden mittojen vaihtelu mukautumalla tartuttavaan pintaan. Magneettitarttujan käyttö tartuntaelementtinä aiheutti siis jälleen uuden vaati-muksen: tarttujan tulee mukautua tartuntapintaan.

Oleelliseksi kokonaisuudeksi tarttujasuunnittelun kannalta osoittautui magneettitar-tunnan edellyttämä tarttujan mukautumismekanismi. Mukautumismekanismille hahmo-teltiin erilaisia konsepteja. Konseptisuunnittelun alussa tutkittiin valmiita joustoele-menttejä ja kehitettiin paikoilleen lukittavan nivelen konseptia, joka sijoitettaisiin mag-neetin yläpuolelle. Magneetille määritettiin nivelpisteitä, joiden suhteen se kääntyy ja paikoittuu. Tästä opittiin seuraava vaatimus: lukitusmekanismin nivelpisteet on tuotava mahdollisimman lähelle tartuntapintaa. Mitä korkeammalle tartuntapinnasta nivel on, sitä pidemmän matkan magneetin tulisi liukua tartuntapinnalla mukautuessaan pintaan. Liian korkealle tartuntapinnasta asetettu nivel voisi johtaa magneetin kiilautumiseen väärään orientaatioon ja tartunnan epäonnistumiseen.

Mukautumismekanismin konseptia kehitettiin edelleen. Konseptisuunnittelussa he-räsi ajatus ilman nivelpisteitä vapaasti rajatulla alueella kelluvasta magneetista, johon kohdistuu magneettia kappaleen pintaan painava voima. Magneetissa voisi olla erikseen kappaleen paikoittava lukitusmekanismi. Lukitusmekanismin konseptivaihtoehtoiksi valikoituivat seuraavat: hahloihin paikottuvat tapit tai kiilapalat. Seuraavat suunnittelun

vaatimukset olivat muodostuneet: magneetin on kelluttava vapaasti, painauduttava tartuntapintaa vasten ja oltava lukittavissa tarkkaan asentoon.

3.2.3 Vaatimuslista

Seuraavan sivun taulukossa on kuvattu tarttujan konseptisuunnittelussa muodostunut vaatimuslista. Vaatimuslistaan luetteloidaan järjestelmän toiminnan vaatimukset. Tarttujan tiedon- ja vaatimustenkeruun avulla määritellään ongelmaa, järjestelmän toimintoja ja toimintojen muodostamia rakenteita. Huomioitavia vaatimuksia on laajennettu seuraavien kategorioiden avulla: turvallisuus, ergonomia, valmistus, laadunvalvonta, koonpano, kuljetus, käyttö, huollettavuus, kierrätys ja käytetyt resurssit. Vaatimuslistan muodostamisen tavoitteena on huomioida siis tarpeet koko tuotteen elinkaaren ajalta. Lisäksi vaatimuslistaan on lisätty asiakkaan kanssa solmitussa sopimuksessa sovitut seikat. Kaikkea tarttujalta vaadittua toiminnallisuutta ei aluksi tunnettu, eikä vaatimuslistaa pystytty muodostamaan esitettyyn laajuuteen, vaan se kehittyi yllä kuvatun eri ratkaisukonseptien kokeilun aikana.

Vaatimuslistan mukaan tarttujan on tartuttava työkappaleeseen. Tartunnan on onnistuttava myös, jos kappale on kiinni kuljetushäkin seinämässä. Tarttujan otteen on oltava symmetrinen. Tarttujan on oltava lukittavissa tarkkaan asentoon, ja sen on säilytettävä kappaleen asento siirron aikana ja kyettävä irrottautumaan kappaleesta. Tarttujan käytävänä voimana on paineilma, jota syötetään robotin vaihtolaipan välityksellä. Tarttujan tulee mahtua kuljetushäkkiin, jossa kappaleet saapuvat soluun ja väistettävä häkin laidat niin, että tartunta on mahdollinen. Tarttujan tulee mukautua ja painautua kappaleen tartuntapintaa vasten. Tarttujan mukautumismekanismin mahdollisten nivelpisteiden tulee olla mahdollisimman lähellä tartuntapintaa. Tarttujatoimilaitteen on kelluttava vapaasti ennen tartuntaa. Tarttujan tulee sallia kappaleen orientaation ja ulkomuodon vaihtelua. Orientaation vaihtelu aiheutuu kappaleiden liikkumisesta kuljetuksen aikana valimolta asiakkaan tehtaalte sekä siitä, että kappaleet ladotaan häkkiin käsin. Ulkomuodon vaihtelua esiintyy valukappaleissa ilmoitettujen toleranssien sisällä. Koska konseptisuunnittelussa päädyttiin käyttämään magneettia tartunnan toimilaitteena, tulee tartuntapinta olla puhdistettavissa. Suunnittelussa tulee huomioida robotin työalue ja solun komponentit niin, että tartunta-asento on robotin saavutettavissa, eikä aiheuta tarttujan tai robotin törmäyksiä. Tarttuja on oltava purettavissa ja koottavissa tarkalleen samaan koonpanoon huollon ja komponenttien vaihdon mahdollisuuden vuoksi. Käytännössä tämä tarkoittaa tarttujan eri komponenttien asennon lukitsemista sokkien avulla. Robotin ohjausjärjestelmän on saatava tieto tarttujan tilasta eli siitä, onko tarttuja auki vai kiinni. Tämä toteutetaan tartuntamekanismia tarkkailevien antureiden avulla, joiden signaali kulkee tarttujan vaihtolaipan sähköliittimen läpi. Kappaleen pysymistä tarttujassa ei erikseen antureilla tarkkailla, koska solussa on kiinteä anturi laserskannerin yhteydessä, jonka avulla varmistetaan, että kaikki tartuttavat kappaleet nousevat häkistä tarttujan mukana. Tarttuja on oltava jätettävissä robotin työkalutelineeseen, ja robotin tulee kyetä käyttöönottamaan tarttuja automaattisesti tarttujanvaihtolaipan avulla. Asiakkaan kanssa solmitun sopimuksen mukaisesti kuljetushäkin kappaleista on kyettävä

nostamaan 70 %. Kaikkia kuljetushäkin kappaleita ei kyetä nostamaan, koska kappaleet voivat takertua häkin seinämiin tai kallistua mahdottomiin hakuorientaatioihin.

Taulukko 3-1 Tarttujan vaatimuslista

<i>Vaatimuslista</i>	
1	Tarttuu kiinni työkappaleeseen
2	Otteen on oltava symmetrinen
3	Lukittavissa tarkkaan asentoon
4	Säilyttää työkappaleen asennon siirron aikana
5	Irrottautuu työkappaleesta
6	Käyttävänä voimana paineilma
7	Mahtuu kuljetushäkkiin
8	Väistettävä häkin laidat
9	Tulee mukautua ja painautua tartuntapintaa vasten
10	Mukautumisen nivelpisteet tulee olla mahdollisimman lähellä tartuntapintaa
11	Tarttujatoimilaitteen on kelluttava vapaasti ennen tartuntaa
12	Sallii työkappaleen orientaation vaihtelua
13	Sallii työkappaleen ulkomuodon vaihtelua
14	Tartuntapinnan puhdistaminen
15	Tartunta-asennot ovat saavutettavissa robotin työalueella
16	Tartunta-asennot eivät aiheuta tarttujan törmäyksiä muihin solun komponentteihin
17	Tartunta-asennot eivät aiheuta robotin törmäyksiä muihin solun komponentteihin
18	Purettavissa ja koottavissa tarkasti samaan kokoonpanoon
19	Ohjausjärjestelmä tunnistaa tarttujan tilan anturisignaalien avulla
20	Jätettävissä työkalutelineeseen
21	Robotin käyttöönotettavissa tarttujanvaihtolaipan avulla
22	Kykenee nostamaan kuljetushäkin kappaleista 70 %

3.2.4 Toiminnon abstrahointi

Suunnitteluprosessin aikana tarttujan toiminnon ajattelun mallia abstrahoidaan eli esittää mahdollisimman pelkistettynä yleisellä tasolla, jotta päästäisiin irti henkilökohtaisista mieltymyksistä, jotka eivät ole todellisia tarttujalle asetettuja vaatimuksia. Abstra-

hoitu kokonaistoiminto käsittää tarttujan suorittaman toiminnan sulkematta pois mitään vaatimuslistan vaatimuksia tai toiveita.

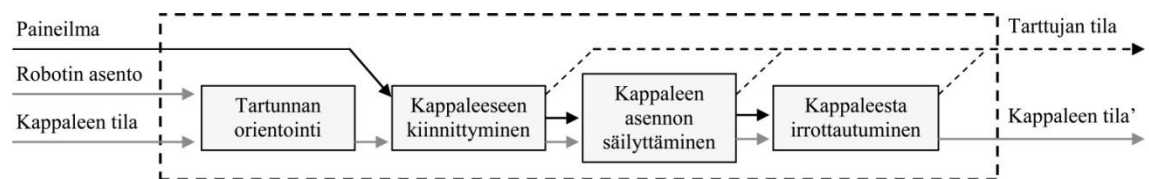


Kuva 3-1 Tarttujan kokonaistoiminto

Kuvassa 3-1 on kuvattu tarttujajärjestelmän abstrahoitu kokonaistoiminto eli tarttuminen. Kokonaistoiminnon sisääntulona on ohjausventtiileistä vaihtolaipan välityksellä kulkeva paineilma, joka on käyttävänä voimana tai ohjaussignaalina tartunnassa. Robotin asento ja kappaleen tila, eli esimerkiksi paikka ja orientaatio, vaikuttavat myös tartuntaan ja ovat järjestelmän sisääntuloja. Ulostuloina ovat tarttujan tilasta kertovat anturien signaalit, jotka voivat olla esimerkiksi sylintereiden tilan anturisignaaleja. Lisäksi ulostulona on muuttunut kappaleen tila. Tarttujan kokonaistoiminto ei ota huomioon solun muuta toimintaa muuten kuin sisään- ja ulostulojen välityksellä. Esimerkiksi kappaleiden tunnistaminen kuljetushäkissä ja siirtäminen robotin liikkeillä eivät kuulu tarttujan toimintoon.

3.2.5 Toimintorakenne

Hiemankin monimutkainen järjestelmä on järkevää jakaa alijärjestelmiin. Systeemiteorian menetelmien avulla tarttajakokonaisuus voidaan mallintaa järjestelmäksi, joissa systeimirajoilla jaetut toiminnot kytkeytyvät rajapinnoistaan yhteen erilaisten tulo- ja lähtösuureiden avulla. Alijärjestelmien jaottelua tehdään tässä järjestelmän yksittäisen toimintojen mukaan. Muita teknisten kokonaisuuksien mahdollisia jaottelun keinoja ovat toimintasekvenssit ja järjestelmän vaatimukset. (Ulrich et al. 2008, s.103)



Kuva 3-2 Tarttujan toimintorakenne

Järjestelmä on jaettu osatoimintoihin, ja sen toimintorakenne on esitetty yllä. Toimintorakenteessa on määriteltävy tarttujan rajapinta ympäristönsä kanssa, yksittäisten osatoimintolohkojen rajapinnat sekä järjestelmän eri lohkot yhteen kytkevät muuttujat.

Tartunta orientoidaan eli joko tarttuja mukautuu kappaleen asentoon tai kappale orientoidaan tarttujalla hallittuun asemaan. Kappaleeseen kiinnitytään, ja kappaleen asento säilytetään sen siirron aikana. Viimeisenä rakennekaavion osatoimintona kappale

leesta irrottaudutaan. Tartuntoja ohjataan paineilmalla, ja jokaisessa ohjausvaiheessa tarttujan tilasignaali lähetetään ulos järjestelmästä.

3.2.6 Ratkaisuvaihtoehdot

Toiminnoille haetaan ratkaisuvaihtoehtoja ja näistä muodostetaan yhdistelmiä. Yhdistelmien toiminnallisuutta analysoidaan, jonka pohjalta tehdään optimaalisen ratkaisun valinta. Prosessin lopputuloksena muodostuu suunnitelma järjestelmän implementoinniksi. Ratkaisuvaihtoehtojen valintaprosessikaan ei kuitenkaan ole suoraviivainen ja staattinen, vaan sisältää väistämättä iteratiivisuutta ja prosessin eri vaiheisiin palaamista.

Tartunnan orientoinnille suunnittelun aikana kehitettyjä ratkaisukonsepteja olivat vapaa kellunta, kiilakappaleilla tai hahlojen ja tappien avulla asentonsa hakeva orientointi, lukittava nivel tai valmiina ostokomponenttina hankittava Schunk AGE joustoyksikkö. Orientoinnin ratkaisuvaihtoehdoista valittiin kehitettäväksi konseptiksi vapaa kellunta ja kiilakappaleilla orientointi.

Kappaleeseen kiinnittymiseen ja siitä irrottautumiseen käytettävien ratkaisujen suunnitteluprosessin aikana harkittuja konsepteja olivat harppuunamainen tappi, leukatarttuvia ulkopuolisella otteella, leukatarttuvia sisäpuolisella otteella ja magneettitarttuvia, joista edelleen kehitettäväksi konseptiksi valittiin magneettitarttuvia.

Kappaleen asennon säilyttämiseksi kappaleen orientoinnin vuoksi luotu jousto tulee lukita. Magneettia pintaan painavan voiman vaikutusvaihtoehtoiksi kehitettiin seuraavat vaihtoehdot: jousimekanismi, pneumaattinen sylinteri tai työkappaleen oma painovoima. Luotettavimmalta vaikuttavaksi vaihtoehdoksi valikoitui pneumaattinen sylinteri. Yksittäisten osatoimintojen valitut ratkaisuvaihtoehdot yhdistettiin tarttujan kokonaisratkaisuksi, jota alettiin kehittää toteutuskelpoisemmaksi.

3.3 Suunnittelun menetelmät

Suunnittelumetodologia on eri tieteenaloja yhdistävä suunnittelukohteesta riippuvien suunnitteluvaiheiden toimintojen ja niiden sekvenssin suunnitelma. Eräällä tapaa suunnittelutyön metodiikan tavoitteena on muokata ajattelutapaa ja muodostaa relaatioiden ja käsitteiden avulla suunnittelukohteesta optimaalisen ongelmanratkaisun mahdollistava fyysistä maailmaa mahdollisimman todenmukaisesti kuvaava ajattelun malli.

Suunnittelutyötä voi lähestyä prosessi- tai ongelmaorientoituneesti. Prosessorientoituneessa suunnittelussa jokaiselle alijärjestelmälle kehitetään ensin konsepteja ja arvioidaan sitten karkeasti koko järjestelmän toimivuutta. Alijärjestelmien suunnittelua kehitetään valmiiksi toiminnallisiksi kokonaisuuksiksi ja varmistetaan uudelleen koko järjestelmän toimivuus yksityiskohtaisemmin näillä konsepteista jatkokehitteltyillä kokonaisuuksilla. Ongelmaorientoituneessa lähestymistavassa suunnitellaan ensin jokainen alijärjestelmä valmiiksi toiminnalliseksi kokonaisuudeksi, ja sen jälkeen yhdistetään alijärjestelmät ja muokataan niitä tarvittaessa.

Ajattelutyötä voidaan jaotella intuitiiviseksi ja diskursiiviseksi ajatteluksi. Intuitiivinen ajattelu on määritelmältään pakottamatonta, päämäärätöntä ja vapaata ajattelua,

jossa ratkaisuja muodostuu tunnistamattomien herätteiden aikaansaamina oivalluksina määrittelemättömänä ajankohtana. Diskursiivinen ajattelu puolestaan on tietoisempi ajattelutapa, jossa ajatteluun voidaan vaikuttaa ja ongelmanratkaisu tapahtuu askeleittain. Intuitiivista ja diskursiivista ajattelua ei voida kuitenkaan täysin erottaa toisistaan ja ne myös vaikuttavat toisiinsa.

Ratkaisuja yksittäisiin ongelmiin voidaan etsiä generatiivisesti tai korjaavasti. Generatiivinen ongelmanratkaisu tuottaa useita ideoita, joista valitaan soveltuvin. Korjaava ongelmanratkaisu etsii ratkaisua jalostamalla ja parantamalla yksittäistä ideaa.

Suunnittelutyön ajattelua voidaan jaotella ja mallintaa eri tavoin, mutta käytännössä ajattelu ei koskaan edusta yksittäistä ääritapausta, vaan on usean eri tavan yhdistelmä. Suunnittelijan on silti hyvä tiedostaa eri menetelmien olemassaolo, jotta voi järjestelmällisesti valita soveltuvimman lähestymistavan. (Pahl et al. 2007)

Suunnittelun metodologiaa tulee sovelluskohtaisesti muokata. Sovelluskohteiden laaja kirjo edellyttää suunnittelumetodologialta geneerisyyttä ja karkeutta, jotta sitä voidaan varioida tarkemmaksi riippuen suunnittelukohteesta ja -ympäristöstä. Yleisen suunnitteluprosessin eri vaiheet ja iteratiivinen luonne on esitetty työn liitteenä. Suunnittelussa tulee pohtia, mitä metodiikan askeleita on tarpeellista hyödyntää eli mitä suunnitteluprosessin tulisi sisältää. Metodologian rakenteen tulee periytyä suunnittelukohteen rakenteesta, eikä se saa pakottaa suunnittelukohteen rakennetta tarpeettomaan metodologiaan sisäänrakennettuun rakenteeseen. Tämä johtaa käytännössä kohtuullisen yleisen tason suunnittelumetodologioihin, joiden käyttöä suunnitteluprosessissa on vaikea huomata tai hallita.

Tässä luvussa kuvattu konseptisuunnittelu hyödyntää jossain määrin Pahl & Beizin kehittämää tuotekehitysoopin metodologiaa. Metodologian mukaan tuotteen kehitystyö noudattaa eri vaiheista koostuvaa systemaattista rakennetta, ja suunnittelutyö etenee konseptivaiheen kautta yksityiskohtaisempaan kehittelyyn. Menetelmä on liian työläs seurattavaksi dogmaattisesti koko laajuudessaan tarttujasuunnittelussa, joten sitä on noudatettu soveltuvilta osin, jotta mahdollistetaan intuition ja luovuuden luontainen käyttö. Tiedon takaisinkytkentä suunnitteluprosessin aiempiin vaiheisiin vaikeuttaa systemaattisen suunnitteluprosessin käyttöä. Suunnittelutyöhön sisältyy iteraatiota, jonka johdosta metodologian eri vaiheiden edellyttämä dokumentointi tuottaisi tarpeetonta työtä. Metodologiaa on hankala sisällyttää sellaisenaan toistuvaan tarttujasuunnittelutyöhön, koska sama suunnittelumetodologian rakenne on sellaisenaan liian kankea hyödynnettäväksi useissa eri suunnittelukohteissa.

4 MEKANIKKASUUNNITTELU

Konseptisuunnitelman pohjalta edettiin yksityiskohtaisempaan suunnitteluun, jossa muodostettiin mekaniikaltaan valmis ja toiminnallinen magneettitarttuja. Salassapitosopimuksen vuoksi tarttujan komponenttien valmistajia tai tyyppejä ei tässä työssä ole mainittu, eikä valmistus- tai kokoonpanokuvia ole sisällytetty työhön. Tarttujan suunnittelua ja toimintaa on kuvattu CAD – mallien ja kuvien avulla.

Alla olevassa kuvassa on renderöinti tarttujan fyysisestä ulkomuodosta. Runko on kuvassa muutettu läpinäkyväksi tarttujan sisäpuolisten komponenttien esittämiseksi.



Kuva 4-1 Solidworks Photoview 360 renderöinti tarttujan CAD - mallista

4.1 Mekaniikkasuunnitteluprosessi

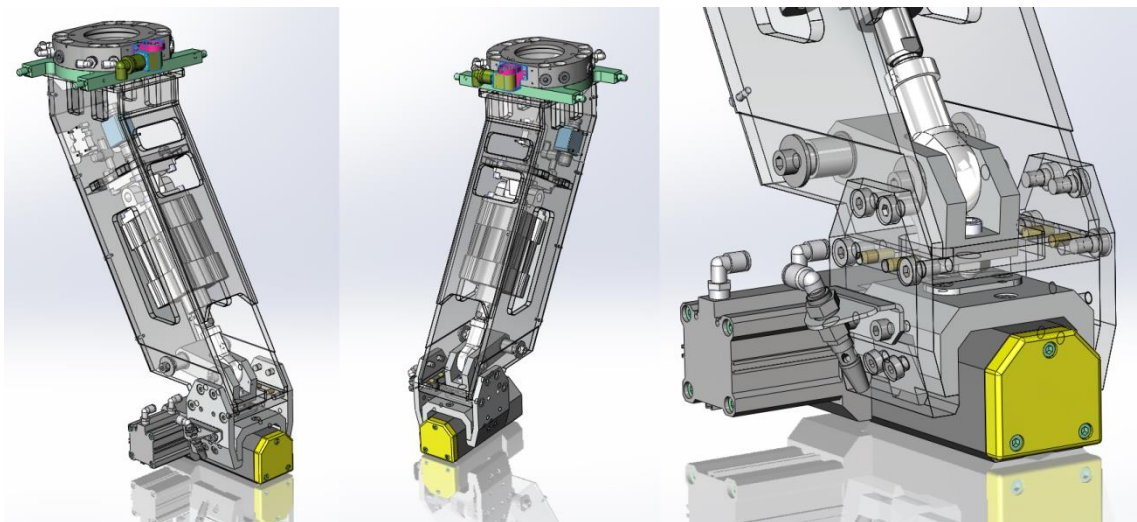
Mekaniikkasuunnittelua lähestyttiin ensin prosessorientoituneesti, jolloin koko tarttujalle hahmoteltiin karkea rakenne. Yksityiskohtaisemmassa suunnittelussa työskentely sai ongelmaorientoituneempia piirteitä. Käytännössä suunnittelutyö oli jatkuvasti molempien lähtökohtien yhdistelmä, jonka painopiste vaihteli suunnitteluprosessin aikana.

Konseptivaiheen suunnittelu loi generatiivisesti vaihtoehtoja, joista valittiin soveltuvimmalta vaikuttavat ratkaisuehdotelmät. Yksityiskohtainen mekaniikkasuunnittelu oli luonteeltaan valitun vaihtoehdon korjaavaa ongelmanratkaisua.

Suunnittelutyöskentely sopii hyvin oppimisprosessin ja informaatiomuunnoksen määritelmiin. Aluksi tarttujasta tunnettu tieto oli vähäistä. Kokeilemalla ja muuntelemalla iteratiivisesti erilaisia geometrioita ja niiden välisiä relaatioita tarttujan sisäisistä ominaisuuksista ja niiden reunaehdoista saatavan tiedon määrä kasvoi kumulatiivisesti.

4.2 Tarttujakonstruktio

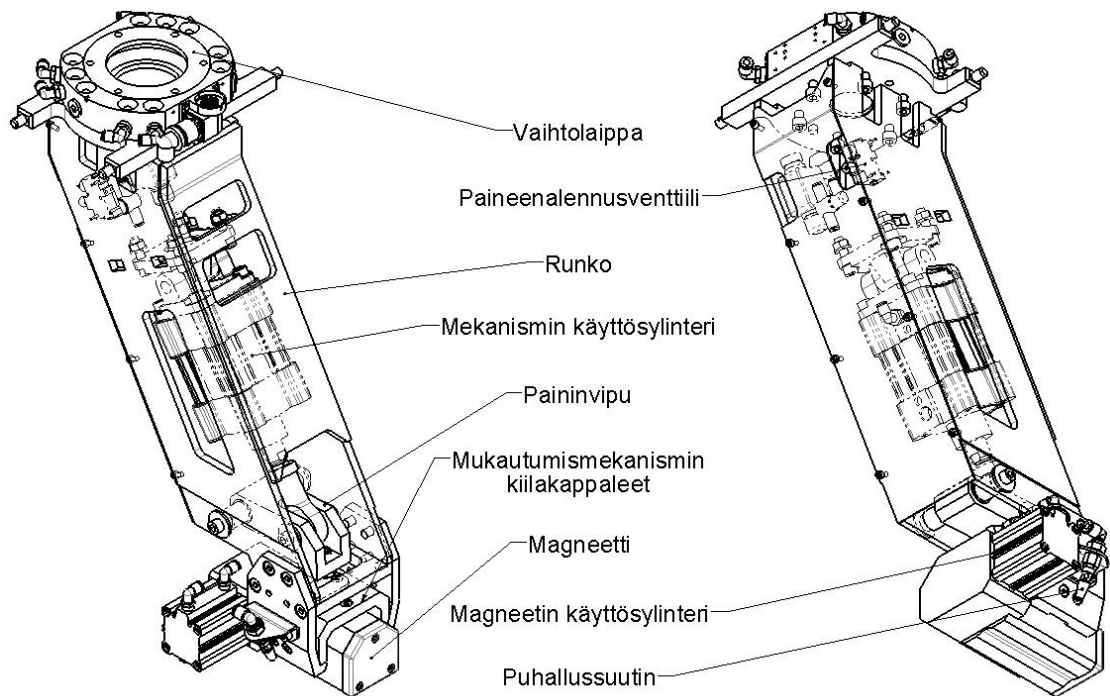
Robotin, laserskannerin, työkappaleen, kuljetushäkin ja muun toimintaympäristön asettamat reunaehdot ja järjestelmän jakaminen diskursiivisesti lähestyttäviin osakokonaisuuksiin yhdistettynä intuitiiviseen ajatteluun loivat alla kuvatun magneettitarttajakokonaisisuuden, jonka tartuntapinta mukautuu tartuttavan kappaleen pintaan.



Kuva 4-2 Solidworks CAD - malli tarttujasta

4.2.1 Tarttujan pääkomponentit ja toimintaperiaate

Tarttujan pääkomponentit on esitetty seuraavalla sivulla.



Kuva 4-3 Tarttujan pääkomponentit

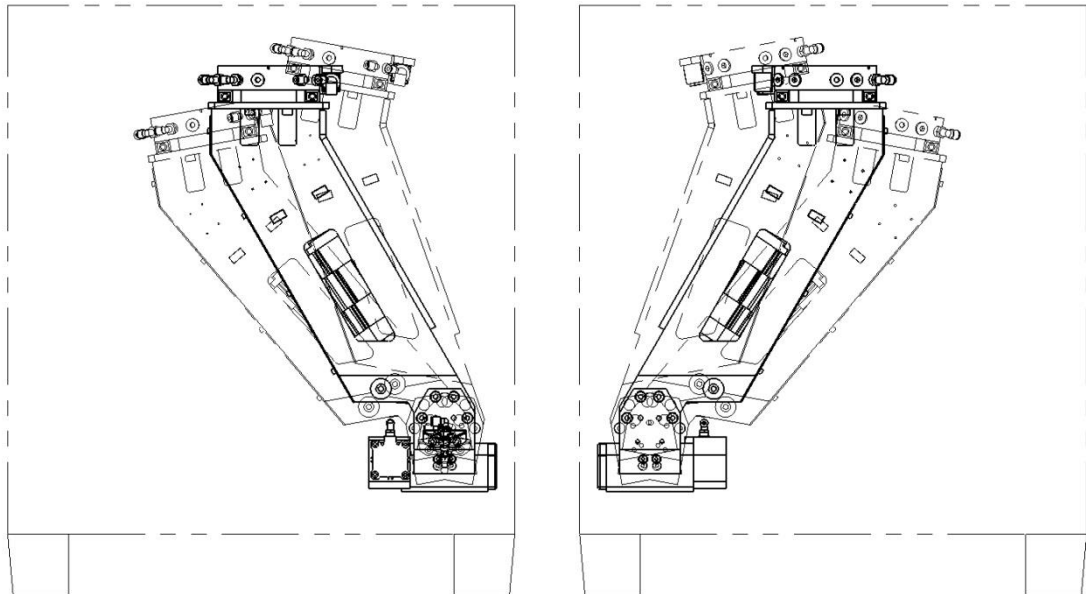
Yllä nähdään tarttujan vaihtolaippa, jolla robotti kytkeytyy tarttujaan, mukautumismekanismin sylinterin paineenalennusventtiili, tarttujan runko, mukautumismekanismin käyttösylinteri, paininvipu, jolla sylinterin voima välitetään mekanismin kiilapaloille, mukautumismekanismin kiilakappaleet, kestopagneetti ja sen käyttösylinteri sekä puhallussuutin, jolla puhdistetaan tartuntapinta. Tarttujan ostokomponentteja ovat vaihtolaippa ja sen sähköliitin, pneumaattiset sylinterit, liittimet, suutin ja venttiilit, laakerit, sylintereiden anturit ja muut sähköosat, magneetti ja kiinnitystarvikkeet. Omavalmisteosia ovat tarttujan runko, suojalevy, paininvipu, akselit, holkit, puhallussuuttimen kiinnityslevy ja mukautumismekanismin osat.

Hakutilanteessa sylintereiden käyttösekvenssi on seuraava: magneetin käyttösylinterin vapautus, mukautumismekanismin sylinterin vapautus, tarttujan tuonti kiinni kappaleeseen, magneetin käyttösylinterin lukitus, nosto ja joustomekanismin sylinterin lukitus. Kappale on tämän jälkeen kiinteästi paikoitettuna tarttujaan. Kappale siirretään ja lasketaan solussa tunnettuun asemaan, joten kappaletta irrotettaessa vapautetaan vain magneetin käyttösylinteri.

4.2.2 Rungon muoto ja rakenne

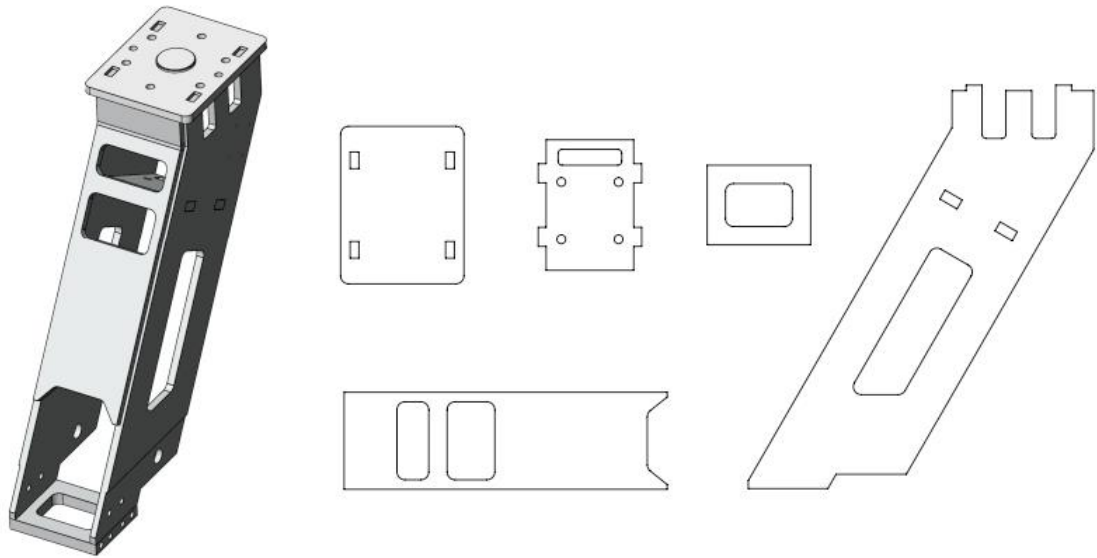
Tarttujan runko on suunniteltu siten, että kappaleiden haku kuljetushäkistä onnistuu mahdollisimman monilla kappaleiden orientaatioilla ja mahdolliset hakuasennot kattavat koko kuljetushäkin sisätilavuuden. Robotin tai tarttujan törmäminen kuljetushäkin laitoihin rajasivat rungon mahdollista muotoa. Lisäksi tarttujan kokonaispituutta rajoitti robotin nivelten sallittujen maksimimomenttien asettamat rajat. Tarttujan pituuden kasvattaminen kasvattaisi myös robottiin kohdistuvaa taivutusmomenttia, koska tarttuja on

taivutusmomentin vipuvarsi työkappaleen ja robotin välillä. Suunnittelun aikana havaittiin, että tarttuja tulee robotin momentinkestosta johtuen jäämään kokonaan kuljetushäkin sisäpuolelle, mikä vaikeuttaa kappaleiden hakua, koska robotin viimeisen nivelen tulee myös tällöin mahtua osittain kuljetushäkkiin. Tartunta olisi helpompi ja törmäysriskittävämpi, jos tarttuja olisi niin pitkä, että hakutilanteessa robotin viimeisen nivelen ei tarvitsisi olla häkin sisällä, koska robotin viimeiseen niveleen liittyy pneumatiikkaletkujen kiinnike ja konenäön kamera. Niveleen liittyvät laitteet rajoittavat liikkuma-aluetta häkin sisällä, ovat herkästi rikkoutuvia ja muodostavat törmäysriskin. Tästä johtuen tarttujan runko suunniteltiin sellaiseksi, että hakutilanteessa robotin laippa on mahdollisimman keskellä kuljetushäkkiä, jotta törmäysriski minimoituisi. Alla olevassa kuvassa on selvennetty kuljetushäkin ja tarttujan maksimipituuden vaikutusta rungon muotoon esittämällä hakutilanteet, joissa kappale on kiinni kuljetushäkin reunassa. Kuvassa on esitetty kuljetushäkin ääriviivat ja tarttujan mukautumismekanismin ääriasennot tarttutapinnan pysyessä vaakatasossa.



Kuva 4-4 Tarttujan hakuasennot kuljetushäkissä

Tarttujan runko on plasmaleikatuista teräslevyosista koostuva hitsattu rakenne, joka koneistetaan tarkkaan muotoonsa. Pelkällä hitsauksella ei päästäisi sovelluksen vaatimaan tarkkuuteen, joten runko on koneistettava. Tarttujan runkolevyihin on tehty aukkoja massan pienentämiseksi, kaapeleiden reiteiksi sekä vaihtolaipan, sylinterin ja paininvivun kiinnittämisen helpottamiseksi tarttujan kokoonpanon aikana.

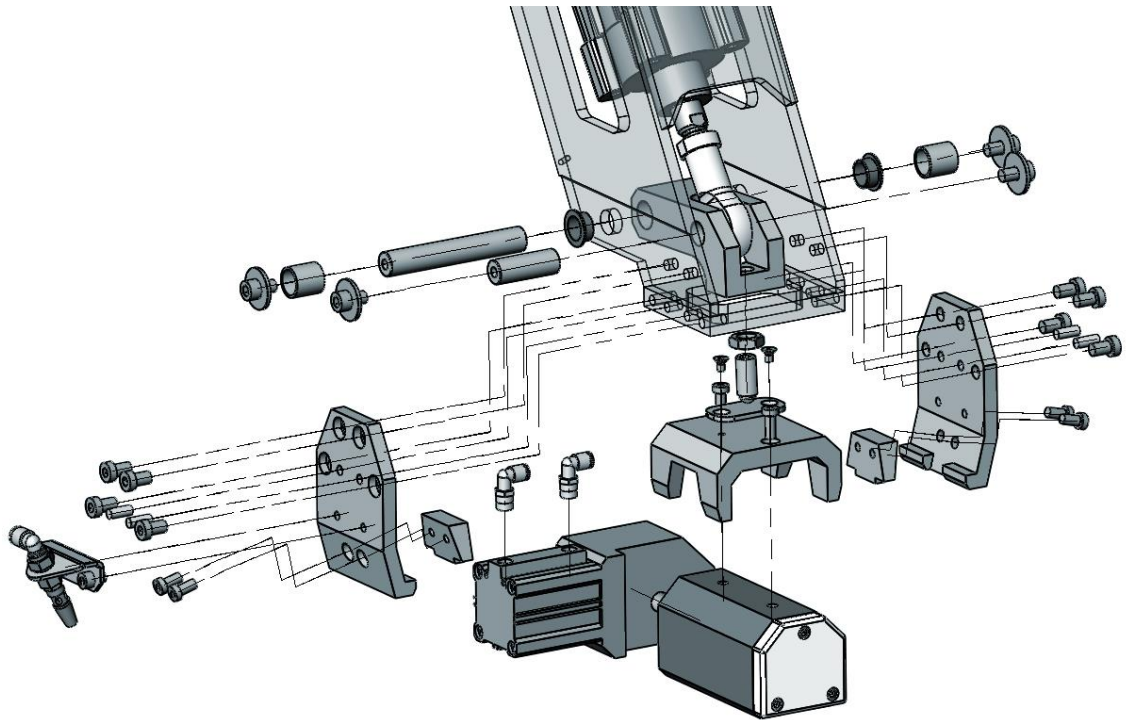


Kuva 4-5 Valmis runko ja rungon levyosien piirteet

Yllä olevassa kuvassa on esitetty valmis koneistettu runko ja rungon muodostavien levyosien piirteet, jotka voidaan lähettää valmistajalle DXF – muodossa. DXF on yleinen CAD – tiedostomuoto, joka on yhteensopiva useiden eri ohjelmistojen välillä. Tämän työn puitteissa kyseistä tiedostotyyppiä hyödynnetään myös levyjen muodon leikkaamisen ohjaamisessa osia valmistettaessa. Levyosien muotoihin on tehty kohdistusnastat ja -hahlot osien kohdistamisen helpottamiseksi hitsauksen aikana. Hitsauksen jälkeen runkoon koneistetaan konstruktion toiminnallisuuden ja kokoonpanon vaatimat piirteet.

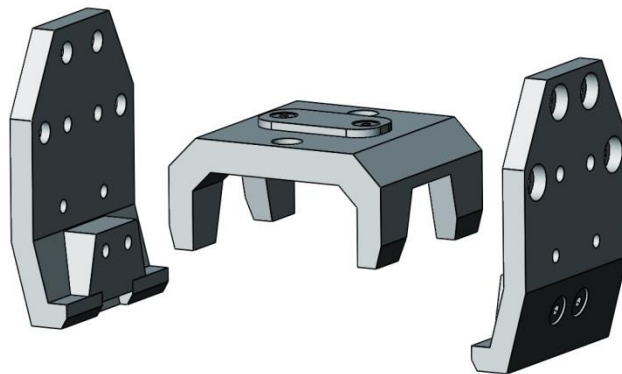
4.2.3 Mukautumismekanismi

Erityistä huomiota suunnittelussa kiinnitettiin mukautumismekanismiin. Mekanismia käyttävän sylinterin ollessa vapautettuna magneetti voi liikkua vapaasti kiilapalojen geometrian rajaamassa tilassa. Mukautumismekanismin lukitus perustuu magneetin paikoittavaan kiilapalaan, tarttujan runkoon kiinnitettäviin kiilan vastinkappaleisiin ja kiilaa paikoilleen paininvivun ja kuulapäisen paininruuvien välityksellä painavaan sylinteriin. Mekanismi on kuvattu seuraavalla sivulla.



Kuva 4-6 Räjätyskuva mukautumismekanismista ja siihen liittyvistä komponenteista

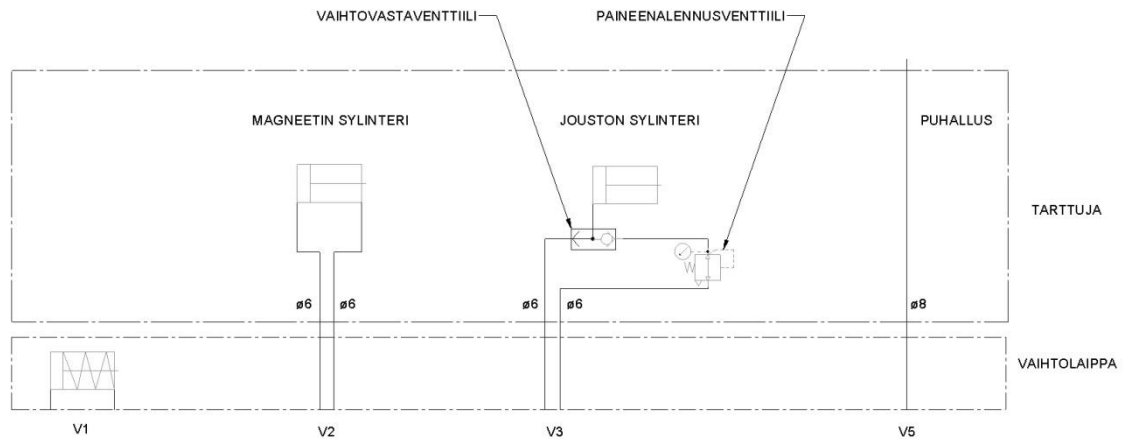
Seuraavassa kuvassa on esitetty tarkemmin kiilakappale, johon magneetti kiinnittyy sekä runkoon kiinnitettävät vastinkappaleet. Magneetin kiilakappaleessa on kulutusräksestä valmistettu levy, johon sylinterin voima kohdistuu. Kiilakappaleet ovat koneistettavia teräsosia.



Kuva 4-7 Kiilakappaleet

4.2.4 Pneumatiikkakaavio

Pneumatiikan kytkennät tarttujan vaihtolaipasta magneettia ja joustomekanismia käyttäviin sylintereihin ja puhallussuuttimeen sekä letkujen koot ja ohjaussignaalit on esitetty kuvassa 4-8.



Kuva 4-8 Pneumatiikkakaavio

Huomionarvoista kaaviossa on se, että joustomekanismia käyttävään sylinteriin kytkeydytään vaihtolaippaan kytkettävän ohjausventtiilin molemmilla linjoilla samalle puolelle sylinteriä vaihtovastaventtiilin avulla. Toinen ohjausventtiilin linjoista kulkee paineenalennusventtiilin kautta, jolloin sylinteri toimii kaasujousena ja varmistaa magneetin mukautumisen kappaleen pintaan. Toista linjaa käytetään sylinterin ja kappaleen paikoilleen lukitsemiseen kappaletta siirrettäessä.

4.3 Koneenosien mitoitus

Tarttujan koneenosat mitoitetaan laskennallisesti.

4.3.1 Runko

Tarttujan runko on tarttujan tukirakenne ja siihen kiinnittyvät suoraan tai välillisesti muut tarttujan komponentit. Runko vaikuttaa tartuntaorientaatioihin ja kappaleen asennon säilyttämiseen siirron aikana. Tarttujan rungon taipumia lasketaan elementtimenetelmän avulla.

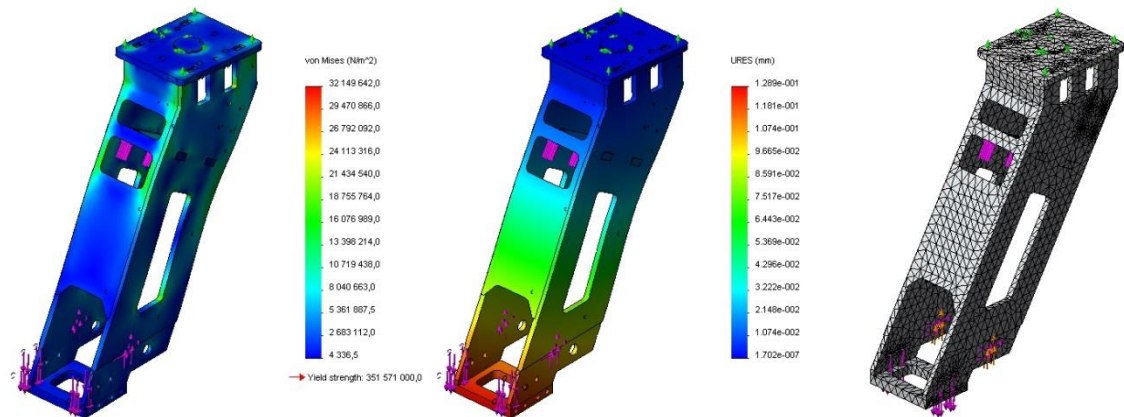
4.3.1.1 Elementtimenetelmä

Elementtimenetelmä eli FEM (Finite Element Method) on työkalu, jota voidaan hyödyntää tarttujan rungon mitoituksessa. Sen avulla voidaan selvittää rungon sisäisten voimien aiheuttamia muutoksia. Elementtimenetelmä perustuu monimutkaisten kontinuumien jakamiseen yksinkertaisiin geometrisiin elementteihin, joiden avulla approksimoidaan kontinuumin käyttäytymistä. Materiaalin ominaisuuksia ja elementtien suhteita mallinnetaan tuntemattomilla muuttujilla elementtien kulmissa. Ottamalla lisäksi huomioon kontinuumiin vaikuttavia kuormituksia ja rajoitteita, voidaan ratkaista haluttuja ominaisuuksia. (Chandrupatla et al. 2002)

Rungon mitoitukseen käytetään Solidworks – mekaniikkasuunnitteluohjelmiston FEM - laskentaominaisuutta nimeltä Cosmosworks, joka uusimmissa ohjelmiston versioissa tunnetaan nimellä Solidworks Simulation. Ohjelmisto hyödyntää laskennassa

kolmiulotteisia tetraedrielementtejä, joiden avulla saadaan laskettua likimääräisesti rakenteen jännityksiä, siirtymiä ja taipumia.

FEM – laskennan avulla optimoitiin rungon levyosien seinämävahvuutta. Tavoitteena oli minimoida rungon taipumat. FEM – laskennassa käytettiin materiaalina AISI 1020 – terästä. Laskentamenetelmä ja tarkat tulokset ovat työn liitteenä. Seuraavassa kuvassa on esitetty rungon jännitysjaakauma, taipumajakauma ja laskennassa käytetty elementtiverkko. Maksimijännitys on 32 MPa ja maksimisiirtymä on 0,13 mm.



Kuva 4-9 Solidworks Simulationilla määritetty rungon jännitys- ja siirtymäjaakauma sekä laskennan elementtiverkko

Analyysin avulla määritettiin rungon levyosien seinämävahvuudeksi 10...16 mm. Rungon kokonaismassa on 20 kg.

4.3.2 Kestomagneetti

Magneetin tyyppi valittiin magneettivalmistajan valikoimasta huomioiden suurimman tarttuvalla käsiteltävän kappaleen massa ja magneetin ulkogeometria. Kyseessä oleva magneetti on kestopomagneetti, johon on tehty alihankintayrityksen toimesta modifikaatio, jolla magneetti muutettiin käsikäyttöisestä magneetista robotiikkaan soveltuvaksi pneumaattisella sylinterillä käytettäväksi magneetiksi. Modifikaatio heikentää jossain määrin magneetin nimellistehoa, ja kappale voi törmäillä ja takertua sitä nostettaessa kuljetushäkin seiniin luoden putoamisriskin. Näistä syistä johtuen valittiin konstruktiossa käytettäväksi magneetiksi tarvittua nimellistehoa tehokkaampi kestopomagneetti, jonka sallittu maksimikuorma on 250 kg.

4.3.3 Pneumaattisen sylinterin ja paininvivun mitoitus

Pneumaattisen sylinterin ja paininvivun mitoituksessa tutkitaan niiden vuorovaikutuksia ja liikkeitä. Vivun ja sylinterin vaikutus toisiinsa on suuri, ja sen vuoksi ne mitoitetaan samanaikaisesti. Mitoituksessa hyödynnetään mekaniikkaan kuuluvia statiikan ja lujuusopin teorioita. Paininvipu on kiinteä kappale eli solidi, jonka käyttäytymistä kuormitusten alaisena tutkitaan. (Salmi 2006, s.143)

4.3.3.1 Vivun tasapainotila

Tutkitaan paininvipuun vaikuttavia voimia ja tasapainotilaa. Käytetään xy – tasossa vaikuttavia voima- ja momenttiyhtälöitä ja kuvataan vivun voimasysteemejä pistevoimien ja niiden resultanttien avulla. Paininvipu on jäykkä kappale, ja se on tasapainossa, jos se pysyy levossa tai liikkuu suoraviivaisesti vakionopeudella. Tällöin vipuun vaikuttavat ulkoiset voima- ja momenttiresultantit muodostavat nollavoimasysteemin. ”Kappaleen sanotaan olevan tasapainossa, jos kappaleen jokaiseen partikkeliin vaikuttavien voimien resultantti häviää” (Salmi 2006, s.21) Tästä seuraa seuraavat jäykän kappaleen tasostatiikan tasapainoyhtälöt komponenttimuodossa. (Salmi 2006, s.100)

$$R_x = 0 \quad (1)$$

Voimaresultantti R_x vaikuttaa x – akselin suuntaisesti ja sen suuruus on nolla. Vastavasti voimaresultantti R_y on y – akselin suuntaisesti vaikuttavien voimien summa.

$$R_y = 0 \quad (2)$$

Vipuun voi vaikuttaa voimien lisäksi momentteja, joiden resultantti on momentti M_Q .

$$M_Q = 0 \quad (3)$$

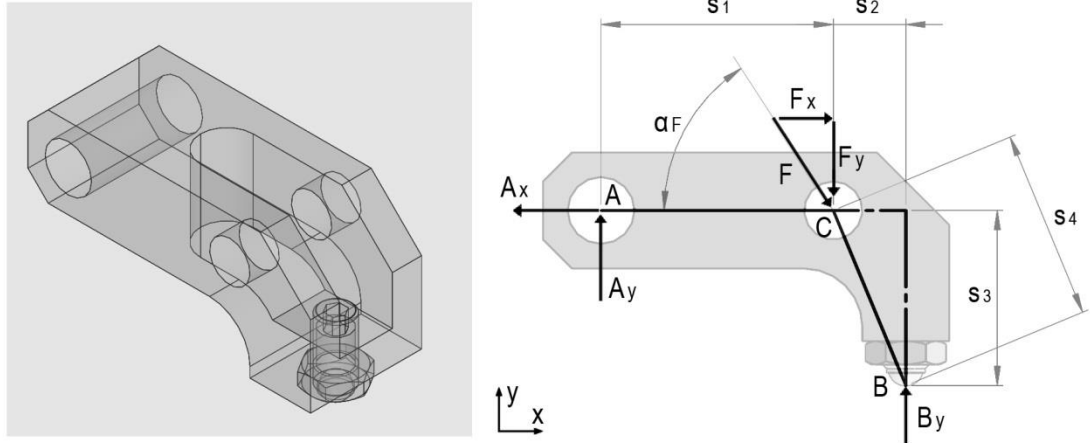
Voiman momentti M_Q pisteen Q suhteen on

$$M_Q = F_Q d_Q \quad (4)$$

missä voima F_Q on etäisyydellä d_Q pisteestä Q .

4.3.3.2 Voimien jakautuminen

Sylinterin mitoittamisen kannalta oleellista on tutkia paininvivun välittämää voimaa. Paininvipuun vaikuttavien voimien ja momenttien määrittämiseksi siitä piirretään vapaakappalekuva, jossa esitetään sen muoto ja kuormitukset. Kuormitukset voivat olla tarttujakonstruktion vaikuttavia ulkopuolisia kuormituksia tai eri komponenttien välisiä järjestelmän sisäisiä liitosvoimia tai -momentteja. (Norton 2006, s.75) Vivun malli ja vapaakappalekuva on esitetty kuvassa 4-10. Kuvassa on esitetty tukipiste A ja siihen vaikuttavat tukivoimakomponentit A_x ja A_y , tukipiste B ja siihen vaikuttava tukivoima B_y ja tukipiste C , johon vaikuttaa sylinterin voima F , jonka komponentit ovat F_x ja F_y . Voiman F kulma x – akselin suhteen on α_F . Mitat s_1 , s_2 , s_3 ja s_4 ovat paininvivun geometrisia kuvan mukaisia mittoja.



Kuva 4-10 Paininvivun malli ja vapaakappalekuva xy - tasossa

Soveltamalla yhtälöä (1) voidaan johtaa seuraava paininvipuun vaikuttavien vaakasuuntaisten voimien voimayhtälö.

$$A_x - F_x = 0 \quad (5)$$

Vastaavasti saadaan yhtälöstä (2) pystysuuntaisten voimien voimayhtälö.

$$A_y + B_y - F_y = 0 \quad (6)$$

Yhtälöiden (3) ja (4) avulla muodostetaan seuraava momenttiyhtälö pisteen A ympäri.

$$B_y(s_1 + s_2) - F_y s_1 = 0 \quad (7)$$

Voimien A_x , A_y ja F_x vaikutussuorat kulkevat pisteen A kautta, joten niiden aiheuttama momentti on nolla. Yhtälöistä (5), (6) ja (7) saadaan ratkaistua paininvipuun vaikuttavat voimat.

4.3.3.3 Varmuysluku

Paininvivun voimien laskennassa käytetty mekaniikan malli on idealisoitu. Yksinkertaistuksia tehtiin esimerkiksi kuormituksen tarkkoihin suuntiin suhteessa paininvivun geometriaan laskennan mahdollistamiseksi ja helpottamiseksi. Käytetyn mallin ja todellisuuden välillä voi olla lisäksi ympäristöstä ja kulumisesta aiheutuvia epävarmuustekijöitä, joiden hahmottamisen vuoksi otetaan käyttöön varmuysluku n .

$$n = \frac{F_{kr}}{F_{sall}} \quad (8)$$

Varmuysluku kuvaa kriittisen kuormituksen F_{kr} ja sallitun laskennallisen kuormituksen F_{sall} suhdetta. Kriittinen kuormitus on kielletyn suuruinen ja johtaa esimerkiksi materiaalin murtumiseen. Tarvittavan varmuusluvun määrittäminen on tässä tapauksessa haastavaa, koska riittävän varmuusluvun valintaan vaikuttavat seikat ovat tässä vaiheessa projektia

tuntemattomia. Liian suuren varmuusluvun käyttö voi johtaa ylimitoitukseen ja tarpeettoman raskaaseen konstruktion, ja puolestaan liian pieni varmuusluku voi johtaa pahimmillaan rakenteen rikkoutumiseen. (Salmi 2006, s.168)

Varmuusluvun n määrittämisessä tarkastellaan tilannetta, jossa robotti pitää maksimimassaista kappaletta tarttujassa ylösalaisin, jolloin kappaleen massa on täysin sylinterin varassa. Kriittiseksi tapaukseksi tarkastelussa määritettiin tilanne, jossa kappaleen painovoima ylittää sylinterin lukitusvoiman, jolloin kappale pääsee liikkumaan.

4.3.3.4 Sylinterin voima

Sylinterissä, jonka poikkileikkauksen pinta-ala on A_s , vaikuttava paine p aikaansaa voiman F seuraavan kaavan mukaisesti.

$$F = pA_s \quad (9)$$

Sijoittamalla yllä olevaan yhtälöön ympyrän pinta-alan lauseke $A_s = \pi(\frac{d}{2})^2$, jossa mitta d on sylinterin halkaisija, saadaan alla esitetty yleisesti käytökelkelpoinen yhtälö sylinterien mitoittamiseen.

$$F = p\pi(\frac{d}{2})^2 \quad (10)$$

4.3.3.5 Sylinterin halkaisija

Sylinterin aikaansaama voima määritetään yllä olevan yhtälön mukaan. Mekanismin varmuusluku lasketaan yhtälön (8) avulla. Varuusluvun yhtälöön sijoitetaan kriittiseksi kuormitukseksi F_{kr} lukitusvoima B_y ja sallituksi kuormitukseksi F_{sall} kappaleen painovoima G_1 .

Laskenta suoritettiin Mathcad – ohjelmiston avulla, ja laskelmat on esitetty tarkemmin työn liitteenä. Laskennasta saatavia tuloksia on esitetty taulukossa 4-1, johon on taulukoitu sylinterin halkaisijoiden d vaikutuksia lukitusvoimaan B_y ja varmuuslukuun n . Lukitusvoimasta B_y on esitetty maksimi- ja minimivoimat. Maksimivoima aiheutuu järjestelmän maksimikäyttöpaineella ja sitä käytetään mukautumismekanismin lukitukseen. Minimivoimaa käytetään sylinterin toimiessa kaasujousena.

Taulukko 4-1 Sylinterin halkaisijan vaikutus lukitusvoimaan ja varmuuslukuun

<i>Sylinterin halkaisija d (mm)</i>	<i>Voiman B_y minimiarvo (N)</i>	<i>Voiman B_y maksimiarvo (N)</i>	<i>Varmuusluku n</i>
50	62,7	752,8	1,7
63	99,6	1195	2,7
80	160,6	1927	4,4
100	250,9	3011	6,8

Sylinterin halkaisijan kooksi valittiin 80 mm, ja paininvivun rakenne ja mitat iteroitiin konstruktion sallimissa puitteissa niin, että mahdollisimman suuri osa sylinterin voimasta F välittyy lukitusvoimaksi B_y .

4.4 Törmäys- ja ulottuvuustarkastelu

Robotin tarttujan käyttöä simuloitiin sekä konseptisuunnittelun aikana että valmiin tarttujasuunnitelman CAD – mallien avulla. Simuloinnissa määriteltiin vaikeimmat tartutuspaukset ja tutkittiin robotin liikkeitä. Tarkastelun avulla varmistettiin, ettei tarttuja tai robotin käsivarsi törmää solun komponentteihin, ja että kuljetushäkin viimeisenkin kappaleen tartunta on mahdollinen. Lisäksi tutkittiin robotin kulkemia reittejä. Robotin tartunta-asentojen tulee olla helposti saavutettavissa robotin työalueella. Tarkasteluissa tulee myös kiinnittää huomiota ns. singulariteettiin. Robotiikassa singulariteetilla tarkoitetaan sellaista asentoa, jossa kaksi tai useampi robotin akseleista ovat samalla suoralla. Singulariteetti aiheuttaa ongelmia robotin ohjauksen kanssa, koska robotilla on useita vaihtoehtoja tulkita asentoaan. Singulariteetipisteissä robotti voi esimerkiksi reitillä säilyäkseen yrittää korjata työkalun asentoa pyöryttämällä akseliaan ympäri 360 astetta, minkä seuraukset ovat ennustamattomat ja pahimmillaan tuhoisat.

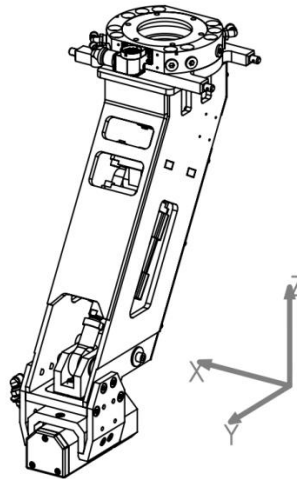
4.5 Kuvien piirto ja PDM

Kun törmäys- ja ulottuvuustarkastelun avulla oli todennettu tarttujan toimivuus, seuraavana suunnitteluprosessin vaiheena oli valmistus- ja kokoonpanokuvien piirto. Valmistuskuvien tekemisessä kiinnitettiin erityistä huomiota magneetin jousto- ja lukitusmekanismin omavalmisteisten komponenttien tolerointiin paikoituksen toiminnallisuuden varmistamiseksi.

Suunniteltaessa tarttujaa sen komponenttien mallit ja kuvat lisättiin PDM (Product Data Management) – järjestelmään eli yrityksen tuotetietoa hallinnoivaan ohjelmistoympäristöön. Yksittäisille komponenteille luotiin nimikkeet, ja tarttujan pääkokoonpanon muodostaman nimikerakenteen avulla ostettiin ja valmistutettiin alihankkijayrityksissä kokoonpanon komponentit.

4.6 Koordinaatisto

Määritellään magneetin koordinaatisto niin, että x-akseli on magneetin lyhyemmän sivun suuntainen, y-akseli on magneetin pidemmän sivun suuntainen ja z-akseli on tartutapinnan normaalivektorin suuntainen eli kohtisuorassa tartuntatasoa vastaan. Koordinaatiston akselien suunnat on esitetty kuvassa 4-11.

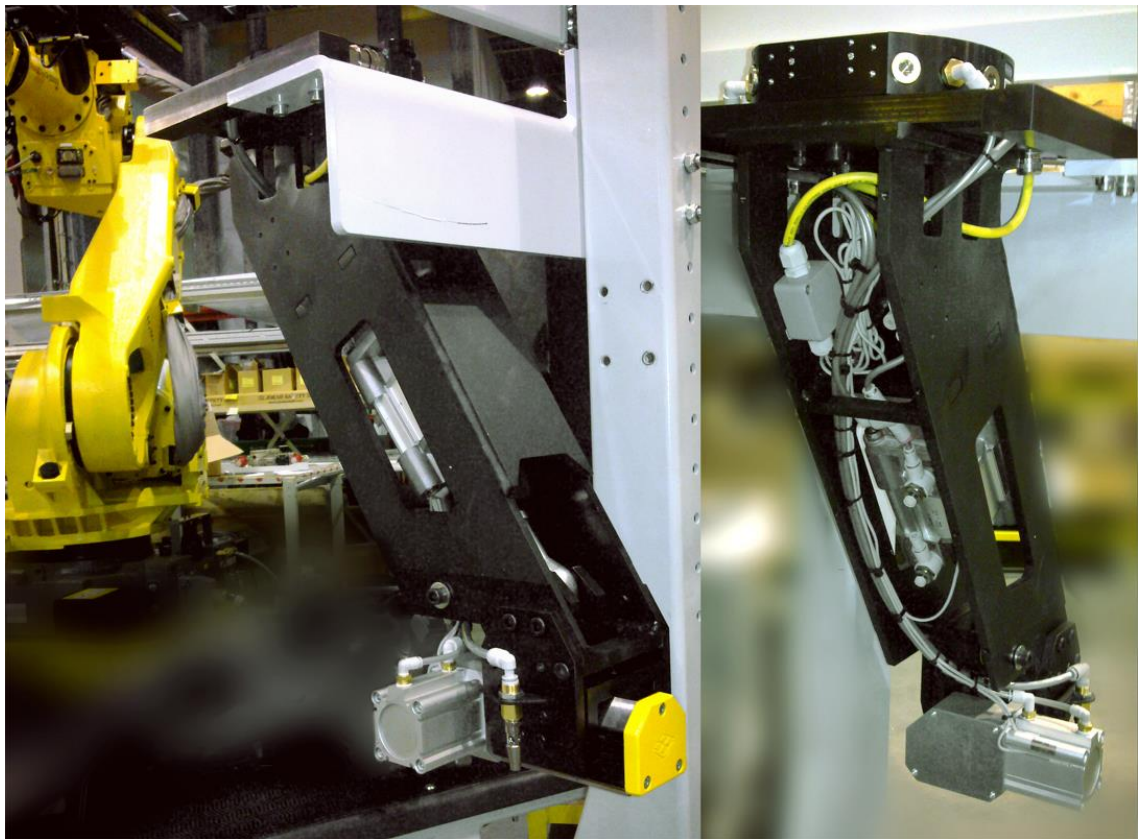


Kuva 4-11 Koordinaatiston akseleiden suunnat

Lineaariliike on akselin suuntaista lineaarista liikettä ja rotaatioliike akselin ympäri suuntautuvaa kiertoliikettä. Määritellään mukautumismekanismiin sallimat magneetin liikkeet niin, että x-akselin suuntainen lineaarinen paikan muutos on siirtymä s_x sekä y- ja z-akselin suuntaiset paikan muutokset ovat vastaavasti siirtymät s_y ja s_z . Magneetin rotaatioliikettä x-akselin ympäri kuvaa kiertymä α_x ja x- ja y-akseleiden ympäri kääntymistä vastaavasti kiertymät α_y ja α_z .

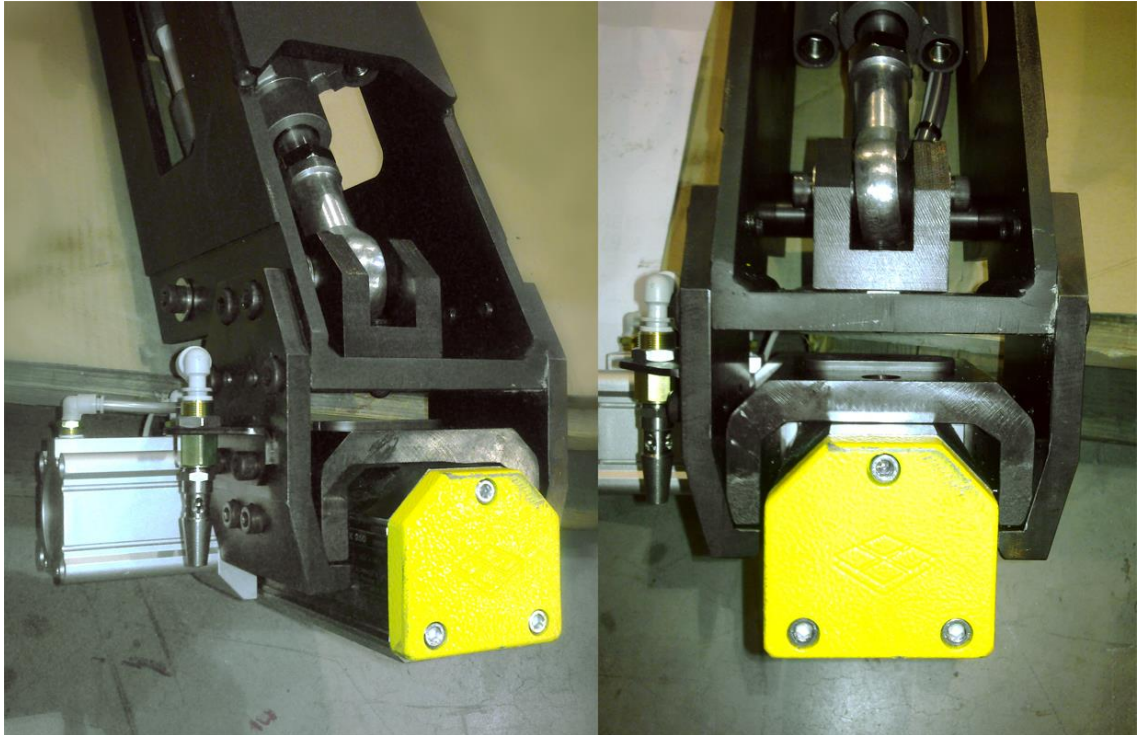
5 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

Tässä työssä suunniteltiin robottisolun magneettitarttuja, joka mukautuu tartuttavan kappaleen pintaan. Suunnittelunmukainen tarttuja kokoonpantiin yrityksen tehtaalla. Valmiista tarttujasta on esitetty kuvat alla. Tarttujan kuvissa on sumennettu käsiteltävä asiakkaan kappale tunnistamattomaksi.



Kuva 5-1 Kokoonpantu magneettitarttuja robotin työkalutelineessä

Tarttujan rungosta on poistettu kuvausta varten takaa suojalevy, jotta nähdään tarttujan sisäiset johdotukset. Tarttujan mukautumismekanismi on kuvattu seuraavalla sivulla.



Kuva 5-2 Magneetin mukautumismekanismi

Alla olevassa kuvassa robotti käyttää tarttujaa testaustilanteessa.



Kuva 5-3 Tarttuja kiinni robotissa

5.1 Magneetin jousto

Tarttujan magneetin mukautumismekanismin jouston ääriarvot määräytyvät eri osien geometrioista. Arvot on tässä määritetty tarttujan CAD - mallin avulla.

5.1.1 Jouston ääriarvot

Magneetin lineaariliikkeen ääriasentojen arvot on esitetty kootusti taulukossa 5-1. Esitetyt arvot ovat magneetin maksimiliikkeitä yksittäisen akselin suuntaan.

Taulukko 5-1 Magneetin lineaariliikkeen ääriarvot

<i>Siirtymä</i>	<i>Ääriarvot (mm)</i>
s_x	$\pm 4,8$
s_y	$\pm 4,6$
s_z	$\pm 8,5$

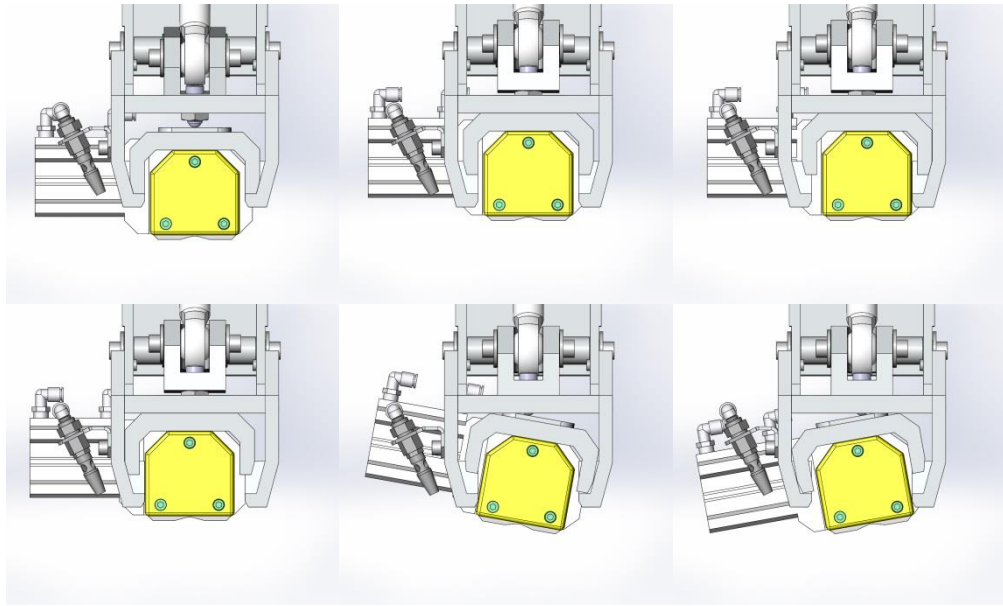
Vastaavat rotaatioliikkeen ääriarvot on esitetty alla.

Taulukko 5-2 Magneetin rotaatioliikkeen ääriarvot

<i>Kiertymä</i>	<i>Ääriarvot (°)</i>
α_x	$\pm 10,3$
α_y	$\pm 10,1$
α_z	$\pm 8,5$

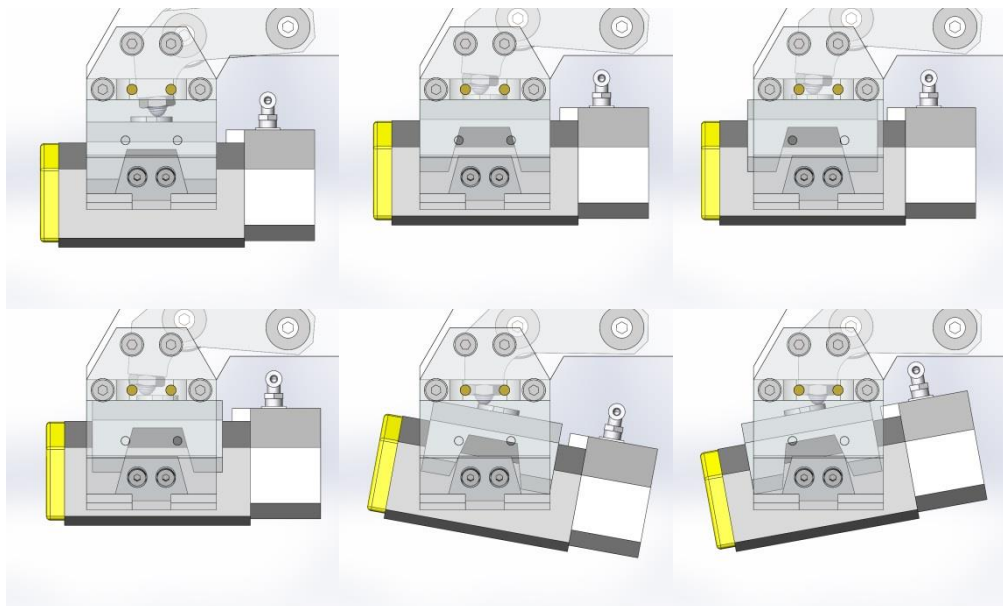
Käytännössä tartuntatilanteissa esiintyy yhtäaikaaisesti useita esitetyistä joustotapa-uksista, koska magneetti kelluu vapaasti rajatulla alueella. Tartuntatilanteissa, joissa esiintyy joustoa yhtäaikaaisesti eri suuntiin, ovat magneetin maksimiliikkeet yllä olevan taulukon mukaisia yhden akselin suuntaisia maksimijoustoja pienempiä. Esimerkiksi kiertymä α_x rajoittaa sen kanssa yhtäaikaaisesti ilmenevää kiertymää α_y .

Seuraavassa kuvasarjassa on esitetty magneetin siirtymien s_x ja s_z , sekä kiertymän α_y ääriasentoja xz - tasossa.



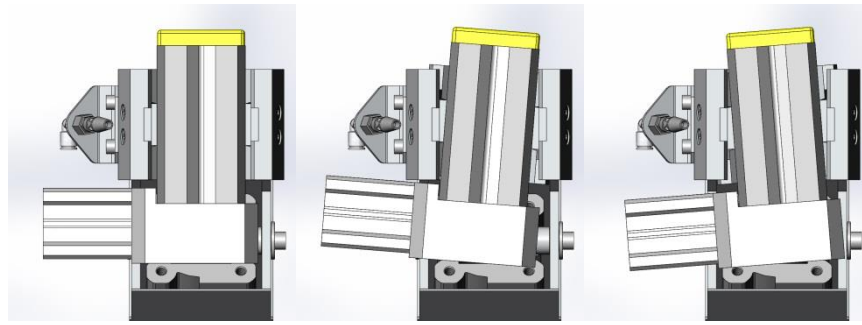
Kuva 5-4 Magneetin siirtymien s_x ja s_z sekä kiertymän α_y ääriasennot xz - tasossa

Seuraavassa kuvasarjassa on kuvattu siirtymien s_y ja s_z sekä kiertymän α_x ääriasennot yz - tasossa.



Kuva 5-5 Magneetin siirtymien s_y ja s_z sekä kiertymän α_x ääriasennot yz - tasossa

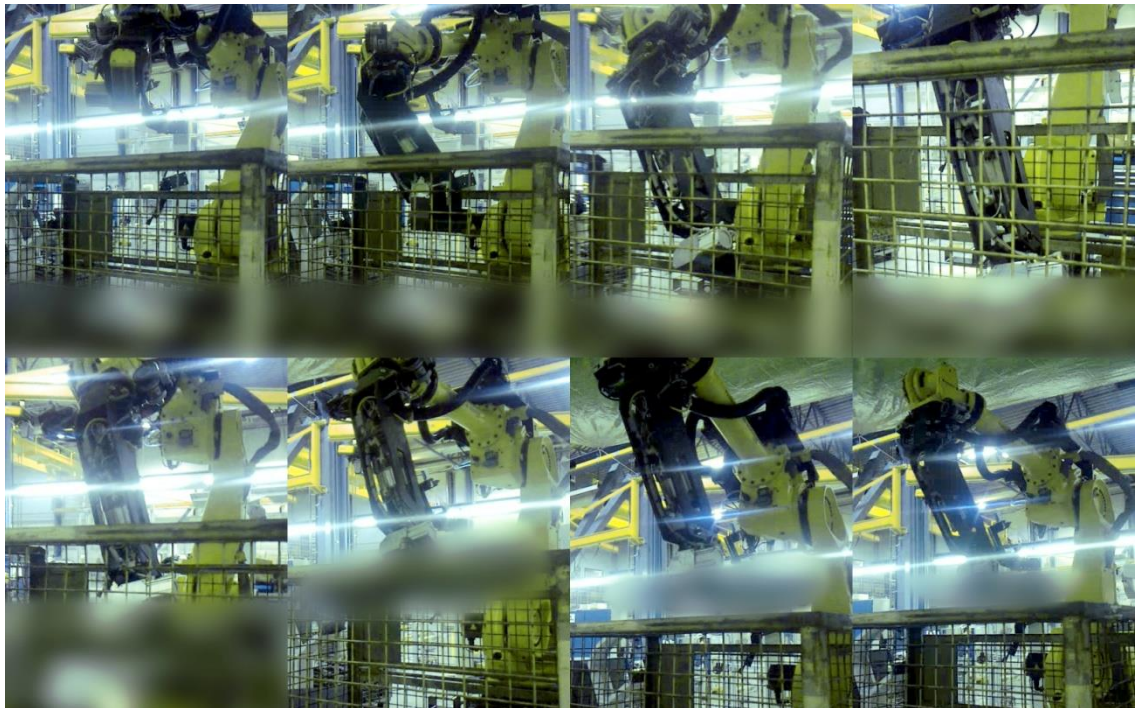
Seuraavassa kuvasarjassa on magneetin kiertymän α_z ääriasennot xy - tasossa.



Kuva 5-6 Magneetin kiertymän α_z ääriasennot xy - tasossa

5.2 Tarttujan testaus

Tarttujaa ja muuta robottisolun toimintaa testattiin yrityksen tehtaalla. Testausta varten luotiin koejärjestely, joka koostui robottisolun pääkomponenteista. Kuljettimella kulkeviin kuljetushäkkiin pinottujen kappaleiden paikka ja asento määritettiin 3D – skannerilla. Alla olevassa kuvasarjassa robotti nostaa havaitun kappaleen kuljetushäkistä. Tartuntasekvenssiin kuluu aikaa n. 20 s, ja siihen sisältyy robotin siirtyminen kotiasemastaan kuljetushäkille, kappaleen nostaminen bufferille ja paluu kotiasemaan.



Kuva 5-7 Kappaleen nostaminen kuljetushäkistä

5.3 Suunnitteluvirheet ja korjaukset

Testauksessa selvisi, että tarttujan joustomekanismin maksimijoustot ovat liian pieniä. Jousto oli suunniteltu huomioimaan kappaleiden valuvirheitä, mutta osoittautui, että joustoa tarvitaan myös lisäämään tartuntamahdollisuuksien määrää, koska ilmeni tapa-

uksia, joissa robotti ei kyennyt poimimaan kuljetushäkistä yhtään kappaletta. Suunnittelun aikana kappaleiden hakuasento oli määritelty liian optimistisesti. Korjauksena kasvatettiin magneetin kääntymiskulmia muuttamalla kiilapalaa, johon magneetti kiinnittyy. Toinen muutos tehtiin tarttujan puhallussuuttimeen. Puhallussuuttimen kiinnityslevy muutettiin sellaiseksi, että tartuntapinnan puhtaaksi puhaltaminen onnistuu samalla tarttujan z – akselin suuntaisella liikkeellä kuin kappaleen hakukin, ettei robotille tarvitse erikseen ohjelmoida kappaleiden puhaltamisasentojen paikkapisteitä. Tässä työssä esitetty tarttujakonstruktio on korjatun suunnitelman mukainen.

Eräänä huolenaiheena oli myös magneettitarttujan aiheuttama kappaleiden jäännösmagnetismi, joka kuitenkin osoittautui niin vähäiseksi, ettei sillä ollut asiakkaan prosessin kannalta merkitystä.

Riittävän varmuusluvun arvioinnin epävarmuus johti siihen, että osa tarttujan komponenteista voi olla ylimitoitettu.

5.4 Käyttö tuotannossa

Korjausten jälkeen tarttuja todettiin toimivaksi, ja robottisolu lähetettiin asiakkaan tehtaalle ja kytkettiin FMS - järjestelmään. Tämän työn kirjoitushetkellä asiakkaan järjestelmän käyttöönotto on kokonaisuudessaan vielä kesken. Asiakkaan automaattisessa tuotantoprosessissa on toistaiseksi valmistettu noin puolen vuoden ajan kahta tässä työssä suunnitellulla tarttujalla tartuttavista kappaleista. Näiden osalta tartunta ja kappaleiden nosto on onnistunut.

5.5 Kehitysehdotukset

Suunnittelussa valittu mekanismi tuottaa verrattain pieniä joustokulmia, ja kohtuullisella konstruktion muokkauksella joustokulman kasvattamiseksi suunnitellun geometrian sallimat joustokulman raja-arvot saavutetaan nopeasti. Testauksesta saadun tiedon valossa konseptisuunnittelussa voisi edelleen harkita ja kehittää useampia joustomekanismin vaihtoehtoja, jotka sallisivat suuremman magneetin jouston.

Tarttujan runko on kohtuullisen isokokoinen, koska käyttävä sylinteri on rungon sisällä. Iso runko hankaloittaa kappaleiden hakemista. Lisäksi robotin momentinkestosta johtuen tarttujan pituutta jouduttiin rajoittamaan. Jos konstruktion pystyisi suunnittelemaan niin, että toimilaitteet ja robotti jäisivät kokonaan kuljetushäkin ulkopuolelle, voitaisiin käyttää kapeampaa ja pidempää runkoa ja mahdollistaa useampia tartunta-asentoja.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tarttujasuunnittelu tämän työn esittämässä laajuudessa on robotiikan toimitusprojekteissa harvinaista. Tavanomaisempaa on käyttää suunnittelun pohjana olemassa olevia tarttujasuunnitelmia, joita muokkaamalla luodaan tarvittava konstruktio. Suunnittelun edellyttämä vaatimusten kartoittaminen on projektin alussa haasteellista. Projektityönä tehtävän asiakaskohtaisen suunnittelutyön edetessä paljastuu helposti reunaehdoja, tiedontarvetta ja vaatimuksia, joita on vaikea ennakoida. Erilaiset konstruktio-, toimilaite- ja komponenttivalinnat voivat synnyttää uuden tiedonhaun tai spesifikaatioiden laatimisen tarvetta. Suunnittelutyön iteratiivisuus on koneensuunnittelun luonteenomainen piirre, ja sen tulisi heijastua niin suunnittelutyötä tekevien yksilöiden ja tiimien toimintatapoihin kuin organisaatioiden toimintarakenteisiin.

Sovelluksissa, joissa tartuttavien kappaleiden orientaatio voi olla satunnainen, tulee tarttujasuunnittelussa kiinnittää erityistä huomiota kappaleiden asennon vaikutuksiin konstruktion geometrian luonnissa ja toimintamekanismien valinnassa. Käytettäessä konenäköä tai skannereita kappaleiden asennon tunnistamiseen rajoitetussa tilassa, on tärkeää tehdä robotin ja tarttujan törmäystarkastelu todenmukaista tilannetta vastaavasti ja riittävällä laajuudella. Tarkastelujen laajuus ja suunnittelun kannalta kriittiset muuttujat ovat kuitenkin prosessikohtaisia ja selviävät usein vasta kun suunnittelutyö on viety tarpeeksi pitkälle.

Robotin tarttujen suunnittelijalta edellytetään kyvykkyyttä käyttää ja ymmärtää sekä abstrakteja että konkreettisia teknisiä malleja, jatkuvaa suunnitteluprosessin uudelleenohjaamista, epävarmuuksien hyväksymistä sekä tavoitteellista ja joustavaa ongelmanratkaisua. Eräs mieltä huojentava huomio on, että epäonnistumisilta ei voi välttyä. Monimutkaisten järjestelmien suunnittelussa ilmenee helposti ainakin joidenkin osatoimintojen suunnittelussa epäonnistumisia. Järjestelmien monimutkaisuuden vuoksi kaikkia suunnittelukohteen ominaisuuksien mahdollisia vaikutuksia on mahdotonta nähdä yhtäaikaaisesti, koska järjestelmän monimutkaisuusaste ylittää ajattelun kapasiteetin. Neuroottisen epäonnistumisen välttämisen yrittämisen sijaan tärkeää on virheisiin reagointi, eli omaa suunnitteluprosessia ja suunniteltua järjestelmää korjaavien toimenpiteiden analysointi, ohjaus ja toteutus ongelmien ilmetessä.

Suunnitteluprosessien tuntemus on tärkeää, jotta suunnittelutyötä pystytään peilamaan systemaattisiin vaiheisiin ja hyödyntämään metodiikkaa soveltuvilta osin. Tämä helpottaa työn aloittamista, etenemistä ja seuraamista sekä parantaa tiedonkulkua. Tarttujasuunnitteluun ei voi kuitenkaan yleisesti soveltaa ennalta tarkasti määriteltyä suunnittelun systematiikkaa. Suunnittelutyö on luovaa ja kohdistettua ajattelua ja oppimista, jossa löytyy helposti ennalta päätettyjen menetelmien kumoavaa tietoa. Suunnittelutyön

valmiiseen rakenteeseen pakottamisen sijaan tärkeää on luoda joustava suunnittelun toimintaympäristö, jossa muut toiminnot sallivat tai parhaillaan tukevat konseptien väistämätöntä vaihtelua ja intuitiivinen luovuus ja ongelmanratkaisu kohdistuvat tuottavaksi ja tiedostavaksi ratkaisukokonaisuuksien kehitystyöksi.

LÄHTEET

Chandrupatla T. R., Belegundu A. D. 2002 Introduction to Finite Elements in Engineering. New Jersey. Prentice Hall, 453 s.

Cornell Creative Machines Lab. 2014. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material. [WWW]. [Viitattu 10.3.2014]. Saatavissa: <http://creativemachines.cornell.edu>

Dhillon B. S. 1996 Engineering Design: A Modern Approach. Ottawa. Times Mirror Higher Education Group, 285 s.

Diftler R. 2010. NASA Robonaut 2 (R2) Overview. [PDF]. [Viitattu 10.3.2014]. Saatavissa: <http://ntrs.nasa.gov>

Direct Industry. 2014 FANUC Europe Corporation [WWW]. [Viitattu 9.3.2014]. Saatavissa: <http://www.directindustry.com>

Fanuc. 2014 Fanuc Robot R-2000iB series. [PDF]. [Viitattu 9.3.2014]. Saatavissa: <http://www.fanucamerica.com>

Fastems. 2013. Fastems Robotics 2013. [WWW]. [Viitattu 9.3.2014]. Saatavissa: <http://www.fastems.com>

Gordon D., Dawes G. 2014 Expanding Your World: Resources for Modeling Human Abilities. [WWW]. [Viitattu 8.3.2014]. Saatavissa: <http://www.expandyourworld.net>

Lhote F., Kauffmann J., Andre P., Taillard J. 1984 Robot Components and Systems. London. Kogan Page, 246s .

Liftrite. 2014. Box & Carton Handling. [WWW]. [Viitattu 10.3.2014]. Saatavissa: <http://www.liftrite.ie/>

Monkman G., Hesse S., Steinmann R., Schunk H., 2004 Robot Grippers. Weinheim. Wiley-VCH, 452 s.

Norton R. L., 2006 Machine Design. Worcester. Pearson Prentice Hall, 981 s.

Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K.H. 2007 Engineering Design: A systematic Approach. Lontoo. Springer, 617 s.

Pahl G., Beitz W. 1992 Koneensuunnitteluoppi. Helsinki. Suomen Metalli-, Kone- ja Sähköteknisen Teollisuuden Keskusliitto MET, 608 s.

Parnas D. L., Clements P.C. 1986 A rational design process: How and why to fake it. IEEE Transactions on Software Engineering Vol. SE-12 No. 2. Victoria. IEEE Computer Society, 7 s.

Pham D. T., Heginbotham W. B. 1986 Robot Grippers: International Trends in Manufacturing Technology. Tokio. Springer-Verlag, 443 s.

Pneumatics Online. 2014. New Needle Gripper from Schmalz. [WWW]. [Viitattu 25.3.2014]. Saatavissa: <http://www.pneumaticsonline.com>

Popular Science. 2014. New Robot Arm Uses Static Cling to Grab Objects in Zero-G, From Satellites to Space Junk. [WWW]. [Viitattu 25.3.2014]. Saatavissa: <http://www.popsci.com/technology>

Reunanen J. 2011 Idea taiteessa ja tuotekehityksessä. Helsinki. Aalto Print, 145 s.

Red Orbit. 2014. Climbing Robot "Stickybot". [WWW]. [Viitattu 25.3.2014]. Saatavissa: <http://www.redorbit.com>

Robotiq. 2014. Robotics Industry News, Applications and Trends: Magnetic Robot End Effector: Top 5 Pros and Cons. [WWW]. [Viitattu 10.3.2014]. Saatavissa: <http://blog.robotiq.com>

Robotnor. 2014. New gripper solutions for non-rigid objects. [WWW]. [Viitattu 25.3.2014]. Saatavissa: <http://robotnor.no>

RobotWorx. 2014 FANUC R-2000iB/165F RJ3iC or R30iA. [WWW]. [Viitattu 9.3.2014]. Saatavissa: <http://www.robots.com>

Salmi T. 2006 Teknillisen mekaniikan perusteet. Tampere. Pressus Oy, 464 s.

Saouma V. E. 2014 Lecture notes in Structural Engineering: Analysis and Design [PDF]. [Viitattu 9.3.2014]. University of Colorado. 142 s. Saatavissa: <http://ceae.colorado.edu>

Schunk. 2010 Gripping Modules. [PDF]. [Viitattu 10.3.2014]. Saatavissa: <http://www.us.schunk.com/>

Schunk. 2014 SWS Quick-change System. [PDF]. [Viitattu 9.3.2014]. Saatavissa: <http://www.schunk.com>

TranspacEurope Ltd. 2014. TEE1P - Grey Heavy Duty Stackable Plastic Euro Pallet. [WWW]. [Viitattu 11.3.2014]. Saatavissa: <http://www.transpaceurope.com>

Ulrich K., Eppinger D. 2008 Product Design and Development. New York. McGraw-Hill, 368 s.

Wallace K. 1987 VDI Design Handbook 2221. Düsseldorf. VDI – komitea

Wikipedia. 2014. Gitterbox. [WWW]. [Viitattu 11.3.2014]. Saatavissa: <http://de.wikipedia.org/wiki/Gitterbox>

Wikipedia. 2014. Robot end effector. [WWW]. [Viitattu 10.3.2014]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Robot_end_effector

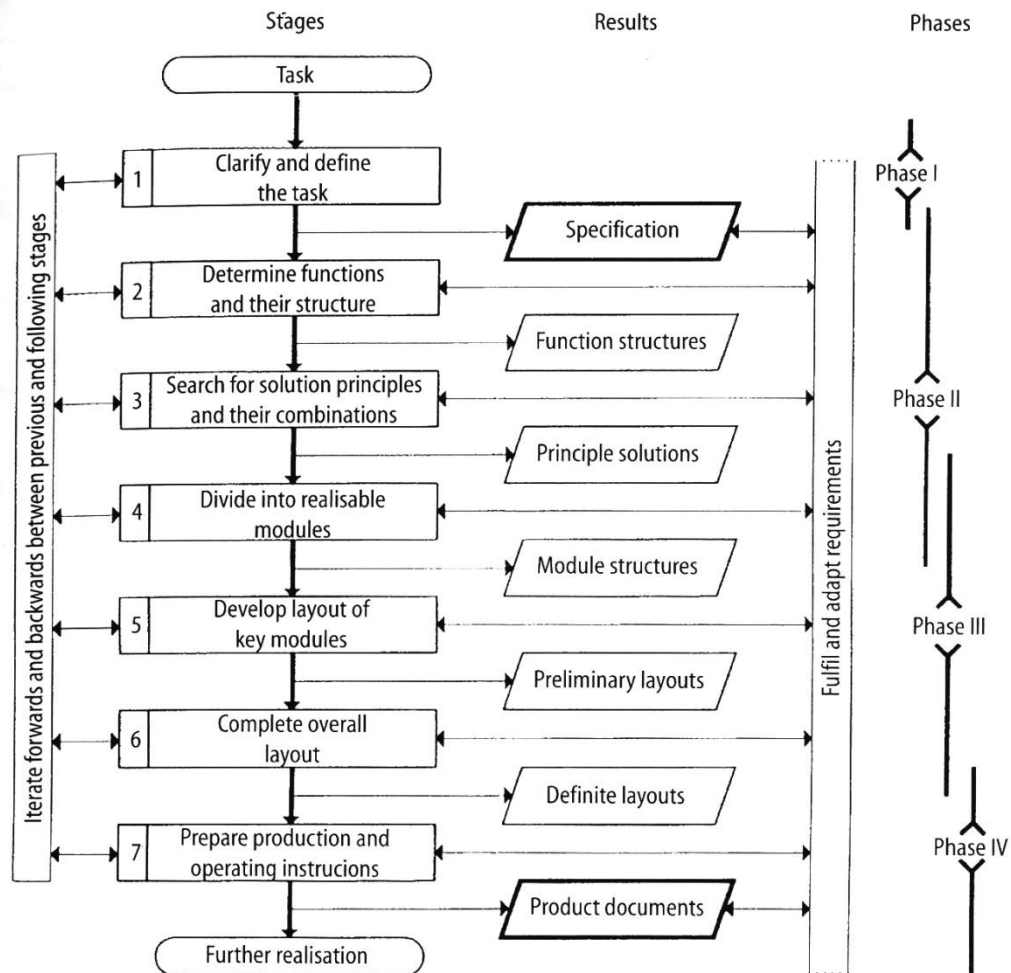
Wikipedia. 2014. Tuotekehitys. [WWW]. [Viitattu 24.2.2014]. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Tuotekehitys>

Wikipedia. 2014. Tuotetiedon hallinta. [WWW]. [Viitattu 11.3.2014]. Saatavissa: http://fi.wikipedia.org/wiki/Tuotetiedon_hallinta

Wolf, A., Steinmann R., Schunk H. 2005 Grippers in Motion : The Fascination of Automated Handling Tasks. Berliini. Springer-Verlag, 248 s.

LIITE 1: YLEINEN SUUNNITTELUPROSESSI

Suunnittelumetodologioiden kehittäjistä ja suunnittelijoista muodostuva VDI - komitea on muodostanut systemaattisesta suunnitteluprosessista ohjeiston VDI 2221, joka kuvaa prosessia yleisellä tasolla. (Wallace et al. 1987, Pahl et al. 2007 mukaan) Prosessi on esitetty alla olevassa kuvassa.



Kuva 6-1 Yleinen suunnitteluprosessi (Pahl et al. 2007, s.19)

LIITE 2: MATHCAD - LASKELMAT

Tarkastelun kohteena ovat tarttujan paininvipu ja siihen vaikuttavat sylinterin voimat. Tarkastelun avulla mitoitetaan sylinterin halkaisija.

Alkuarvot

Järjestelmän käyttöpaine on lukittaessa mukautumismekanismia 0,6 MPa. Magneetin kelluessa vapaasti käyttöilma kulkee paineenalennusventtiilin avulla, joka avulla painetta voidaan säätää alueella 0,05...0,6 MPa.

$$p_{\min} := 0.05 \text{ MPa} \quad p_{\max} := 0.6 \text{ MPa}$$

Esitetään sylinterin voima käyttöpaineen p ja sylinterin halkaisijan d yhtälönä. Paineen yksikkö on MPa ja halkaisijan yksikkö on mm.

$$F_1(p, d) := p \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

Voiman F_1 kulma $\alpha_F := 57 \text{ deg}$

Voiman F_1 komponentit $F_x(p, d) := \cos(\alpha_F) \cdot F_1(p, d) \quad F_y(p, d) := \sin(\alpha_F) \cdot F_1(p, d)$

Paininvivun dimensiot $s_1 := 80 \text{ mm} \quad s_2 := 25 \text{ mm} \quad s_3 := 60 \text{ mm} \quad s_4 := 65 \text{ mm}$

Muodostetaan vaaka- ja pystysuuntaiset voimayhtälöt sekä momenttiyhtälö pisteen A ympäri.

$$A.x - F.x = 0$$

$$A.y + B.y - F.y = 0$$

$$B.y \cdot (s_1 + s_2) - F.y \cdot s_1 = 0$$

Ratkaistaan yhtälöryhmästä yhtälöt tukivoimille $A.y$, $A.x$ ja $B.y$.

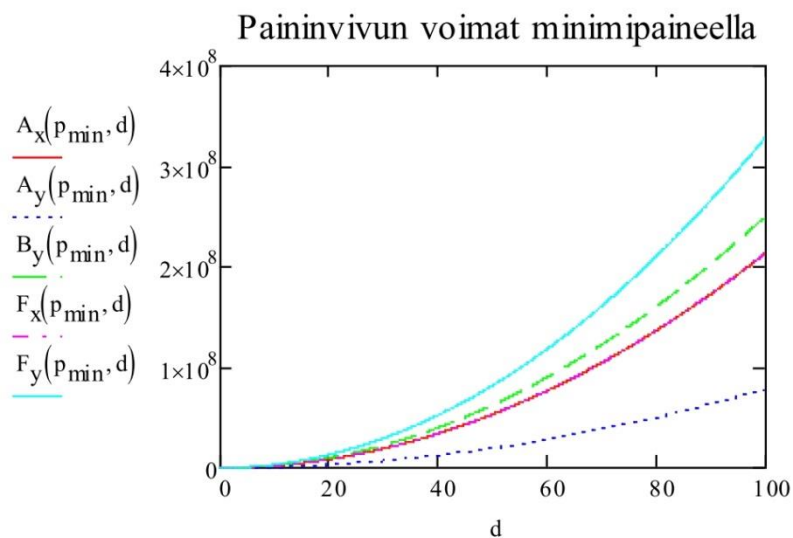
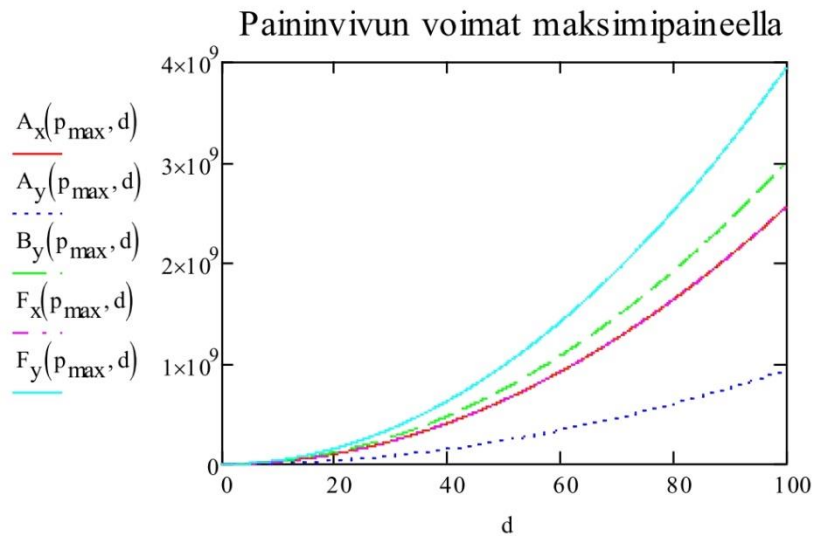
$$A_x(p, d) := F_x(p, d)$$

$$B_y(p, d) := \frac{s_1 \cdot F_y(p, d)}{(s_1 + s_2)}$$

$$A_y(p, d) := F_y(p, d) - B_y(p, d)$$

Voimien yksikkö on newton (N)

Alla olevissa kuvaajissa on esitetty painevivun voimien komponentit sylinterin halkaisijan funktiona käytettäessä järjestelmän maksimi- ja minimipaineita.



Sylinterin mitoituksen kannalta oleellinen voima on mukautumismekanismin lukitusvoima B_y . Tarkastellaan mitoituksen kannalta kriittisintä tilannetta, jossa robotti pitää maksimimassaista kappaletta tarttujassa ylösalaisin, jolloin kappaleen massa on täysin sylinterin varassa. Yksinkertaistetaan tarkasteltavaa tapausta niin, että kuvitellaan käsiteltävän kappaleen massakeskipisteen olevan voiman B_y vaikutussuoralla.

$$\text{Kappaleen paino} \quad m_1 := 45 \text{ kg} \quad G_1 := m_1 \cdot g \quad G_1 = 441.29 \text{ N}$$

Tarkastellaan voimaa B_y ja varmuuslukua n sylinterin halkaisijoilla: 50mm, 63mm, 80mm ja 100mm.

Sylinterin halkaisija 50mm

Minimi- ja maksimilukitusvoimat $B_y(p_{\min}, 50\text{ mm}) = 62.73\text{ N}$

$B_y(p_{\max}, 50\text{ mm}) = 752.78\text{ N}$

Varmuusluku voiman suhteen $n_{50} := \frac{B_y(p_{\max}, 50\text{ mm})}{G_1}$

$n_{50} = 1.706$

Sylinterin halkaisija 63mm

Minimi- ja maksimilukitusvoimat $B_y(p_{\min}, 63\text{ mm}) = 99.59\text{ N}$

$B_y(p_{\max}, 63\text{ mm}) = 1.195 \times 10^3\text{ N}$

Varmuusluku voiman suhteen $n_{63} := \frac{B_y(p_{\max}, 63\text{ mm})}{G_1}$

$n_{63} = 2.708$

Sylinterin halkaisija 80mm

Minimi- ja maksimilukitusvoimat $B_y(p_{\min}, 80\text{ mm}) = 160.59\text{ N}$

$B_y(p_{\max}, 80\text{ mm}) = 1.927 \times 10^3\text{ N}$

Varmuusluku voiman suhteen $n_{80} := \frac{B_y(p_{\max}, 80\text{ mm})}{G_1}$

$n_{80} = 4.367$

Sylinterin halkaisija 100mm

Minimi- ja maksimilukitusvoimat $B_y(p_{\min}, 100\text{ mm}) = 250.9\text{ N}$

$B_y(p_{\max}, 100\text{ mm}) = 3.011 \times 10^3\text{ N}$

Varmuusluku voiman suhteen $n_{100} := \frac{B_y(p_{\max}, 100\text{ mm})}{G_1}$

$n_{100} = 6.823$

Valitaan sylinterin halkaisijaksi 80 mm.

Lasketaan muut vaikuttavat voimat maksimipaineella.

$$A_x(p_{\max}, 80 \text{ mm}) = 1.643 \times 10^3 \text{ N}$$

$$A_y(p_{\max}, 80 \text{ mm}) = 602.23 \text{ N}$$

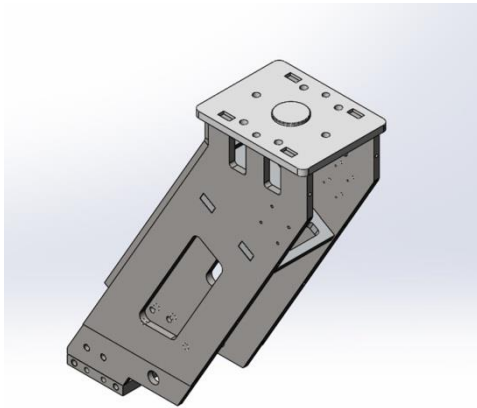
$$F_1(p_{\max}, 80 \text{ mm}) = 3.016 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_x(p_{\max}, 80 \text{ mm}) = 1.643 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_y(p_{\max}, 80 \text{ mm}) = 2.529 \times 10^3 \text{ N}$$

$$B_y(p_{\max}, 80 \text{ mm}) + G_1 = 2.368 \times 10^3 \text{ N}$$

LIITE 3: FEM - LASKELMAT



Simulation of Gripper frame

Date: 12. maaliskuuta 2014

Designer: Janne Lyytinen

Study name: Study 1

Analysis type: Static

Table of Contents

Description	1
Model Information	2
Material Properties	3
Study Properties	4
Units	4
Loads and Fixtures.....	5
Contact Information.....	7
Mesh Information	7
Resultant Forces	8
Study Results	9
Conclusion.....	11

Description

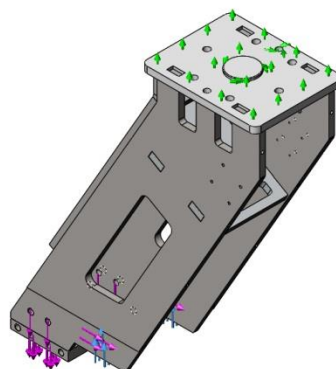
Aim of the simulation is to minimize gripper frame displacements and to determine frame plate thicknesses.



SOLIDWORKS

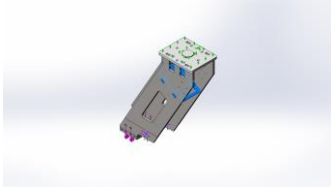
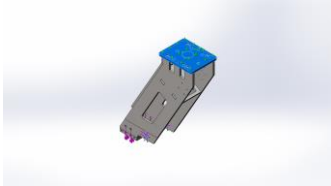
Analyzed with
SolidWorks
Simulation

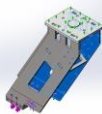
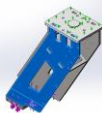
Model Information



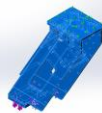
Model name: Gripper frame
Current Configuration: Default

Solid Bodies

Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Mounting plate 	Solid Body	Mass: 1.61552 kg Volume: 0.000204496 m ³ Density: 7900 kg/m ³ Weight: 15.8321 N	\\intra.tut.fi\home\lyytine3\My Documents\Desktop\Gripper solid model\299166.SLDPRT Mar 12 17:58:35 2014
Plate 	Solid Body	Mass: 2.58116 kg Volume: 0.000326729 m ³ Density: 7900 kg/m ³ Weight: 25.2954 N	\\intra.tut.fi\home\lyytine3\My Documents\Desktop\Gripper solid model\299862.SLDPRT Mar 12 17:54:58 2014

<p>Frame plate</p> 	<p>Solid Body</p>	<p>Mass:0.971521 kg Volume:0.00012 2977 m³ Density:7900 kg/m³ Weight:9.5209 N</p>	<p>\\intra.tut.fi\home\lyytine3\My Documents\Desktop\Gripper solid model\300906.SLDPRT Feb 19 17:57:24 2014</p>
<p>Side plate</p> 	<p>Solid Body</p>	<p>Mass:6.01085 kg Volume:0.00076 0867 m³ Density:7900 kg/m³ Weight:58.9063 N</p>	<p>\\intra.tut.fi\home\lyytine3\My Documents\Desktop\Gripper solid model\300913.SLDPRT Feb 19 17:57:24 2014</p>
<p>Side plate</p> 	<p>Solid Body</p>	<p>Mass:6.0097 kg Volume:0.00076 0721 m³ Density:7900 kg/m³ Weight:58.895 N</p>	<p>\\intra.tut.fi\home\lyytine3\My Documents\Desktop\Gripper solid model\300913.SLDPRT Feb 19 17:57:24 2014</p>

Material Properties

Model Reference	Properties	Components
	<p>Name: AISI 1020 Model type: Linear Elastic Isotropic Default failure criterion: Max von Mises Stress Yield strength: 3.51571e+008 N/m² Tensile strength: 4.20507e+008 N/m² Elastic modulus: 2e+011 N/m² Poisson's ratio: 0.29 Mass density: 7900 kg/m³ Shear modulus: 7.7e+010 N/m² Thermal expansion coefficient: 1.5e-005 /Kelvin</p>	<p>SolidBody 1(Mounting plate)(299166-1), SolidBody 1(Plate)(299862-1), SolidBody 1(Frame plate)(300906-1), SolidBody 1(Side plate)(300913-1), SolidBody 1(Side plate)(300913-2), SolidBody 1(Frame plate)(300914-1)</p>
Curve Data:N/A		

Study Properties

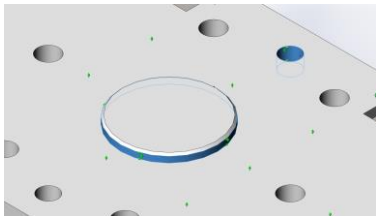
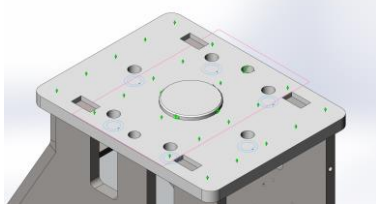
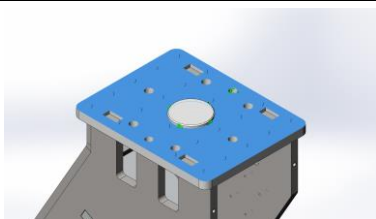
Study name	Study 1
Analysis type	Static
Mesh type	Mixed Mesh
Thermal Effect:	On
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	298 Kelvin
Include fluid pressure effects from SolidWorks Flow Simulation	Off
Solver type	FFEPlus
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	Off
Compute free body forces	On
Friction	Off
Use Adaptive Method:	Off
Result folder	SolidWorks document (\\intra.tut.fi\home\lyytine3\My Documents\Desktop\Gripper solid model)

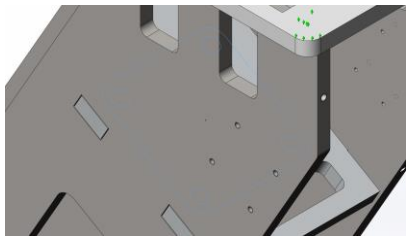
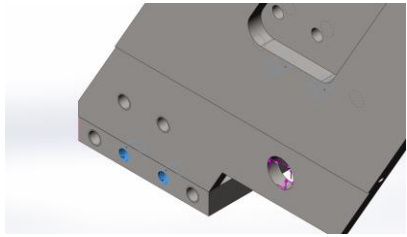


Units

Unit system:	SI (MKS)
Length/Displacement	mm
Temperature	Kelvin
Angular velocity	Rad/sec
Pressure/Stress	N/m ²

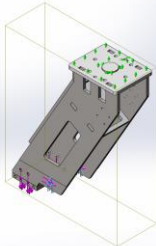


Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details		
On Cylindrical Faces-1		<p>Entities: 2 face(s) Type: On Cylindrical Faces Translation: ---, 0 rad., 0 Rotation: ---, ---, --- Units: mm, rad</p>		
Resultant Forces				
Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	-3149.04	-384.544	-0.0197468	3172.43
Reaction Moment(N·m)	0	0	0	1e-033
Reference Geometry-1		<p>Entities: 6 face(s), 1 plane(s) Reference: Top Type: Use reference geometry Translation: ---, ---, 0 Rotation: ---, ---, --- Units: mm, rad</p>		
Resultant Forces				
Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	0.0203845	-251.233	0.0491333	251.233
Reaction Moment(N·m)	0	0	0	1e-033
Roller/Slider-1		<p>Entities: 1 face(s) Type: Roller/Slider</p>		
Resultant Forces				
Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	-2295.69	-186.038	-28.4372	2303.4
Reaction Moment(N·m)	0	0	0	1e-033

Load name	Load Image	Load Details
Force-1		<p>Entities: 1 face(s) Type: Apply normal force Value: 3016 N</p>
Force-2		<p>Entities: 4 face(s) Reference: Edge< 1 > Type: Apply force Values: ---, ---, 2368 N Moments: ---, ---, --- N·m</p>
Bearing Loads-1		<p>Entities: 2 face(s) Coordinate System: System5 Force Values: 1643 0 0 N</p>
Bearing Loads-2		<p>Entities: 2 face(s) Coordinate System: System5 Force Values: 0 602 0 N</p>

Contact Information

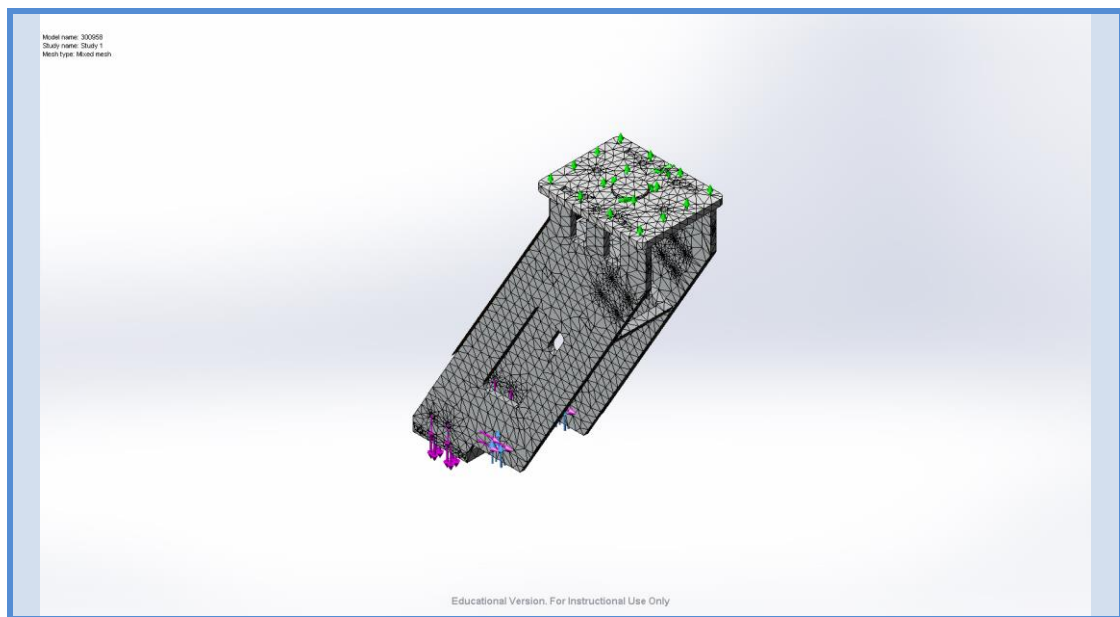
Contact	Contact Image	Contact Properties
Global Contact		Type: Bonded Components: 1 component(s) Options: Compatible mesh

Mesh Information

Mesh type	Mixed Mesh
Mesher Used:	Standard mesh
Automatic Transition:	Off
Include Mesh Auto Loops:	Off
Jacobian points	4 Points
Jacobian check for shell	On
Element Size	15.6996 mm
Tolerance	0.784981 mm
Mesh Quality	High
Remesh failed parts with incompatible mesh	Off

Mesh Information - Details

Total Nodes	31848
Total Elements	16698
Time to complete mesh(hh:mm:ss):	00:00:09
Computer name:	K1242-005-SPC



Resultant Forces

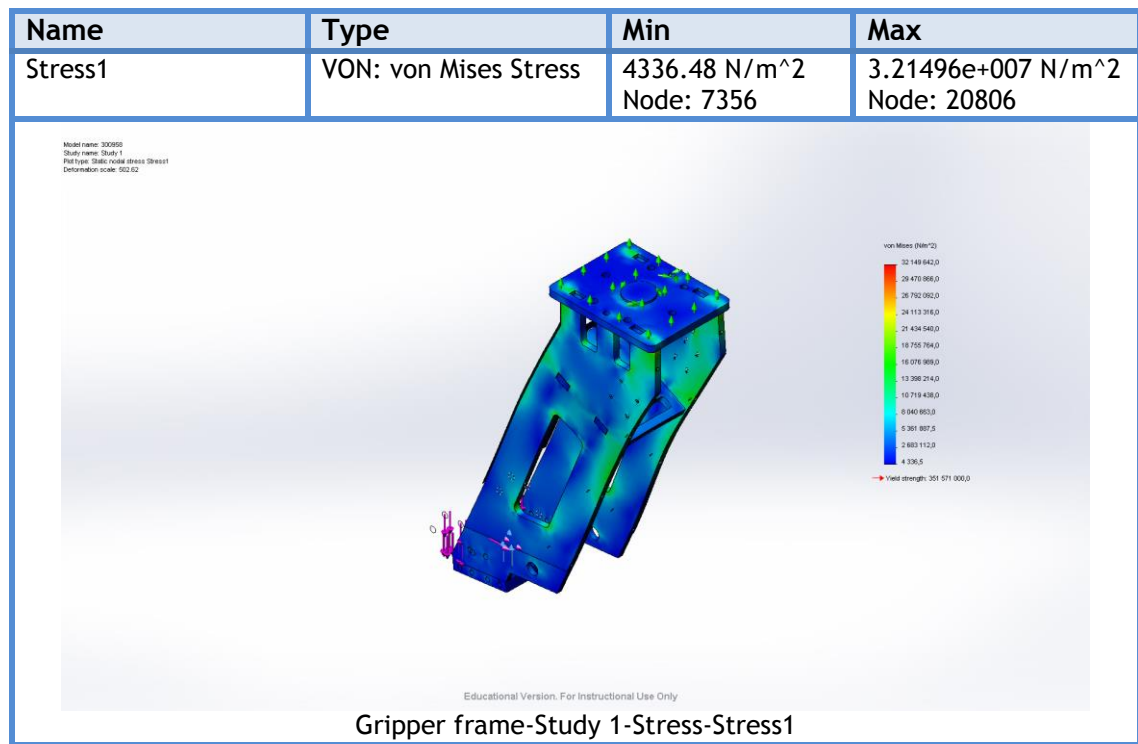
Reaction Forces

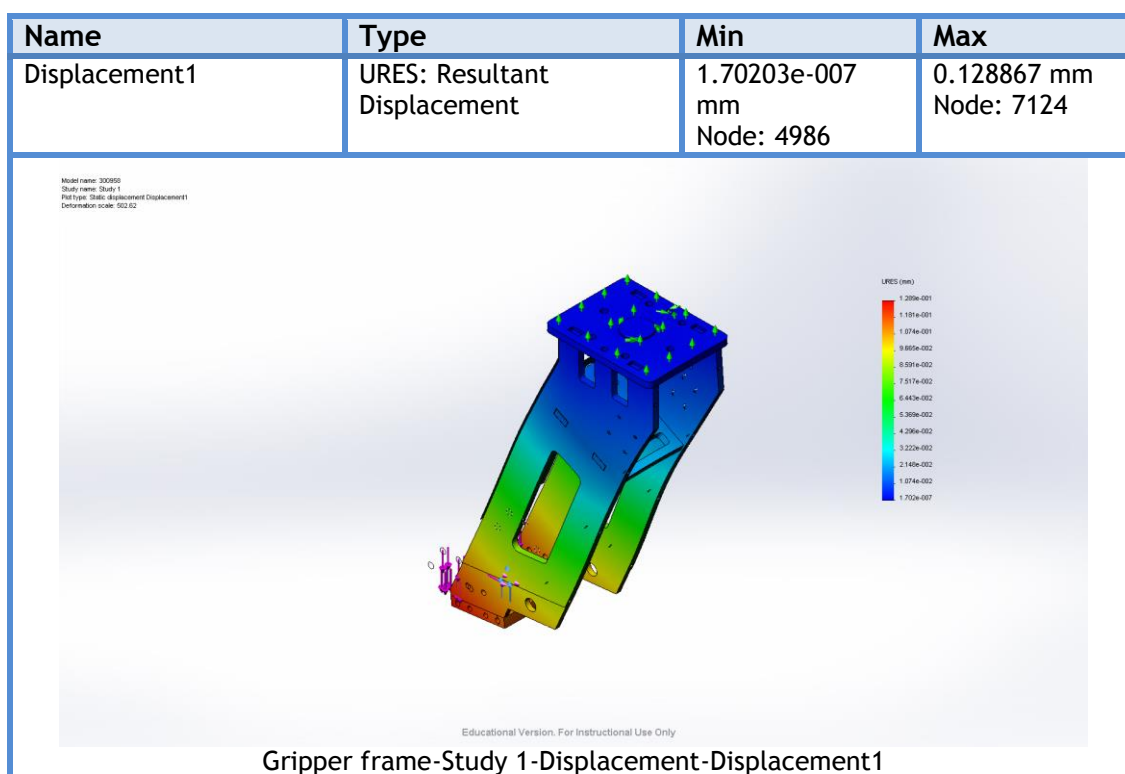
Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N	-3149.07	-843.287	-0.0713623	3260.02

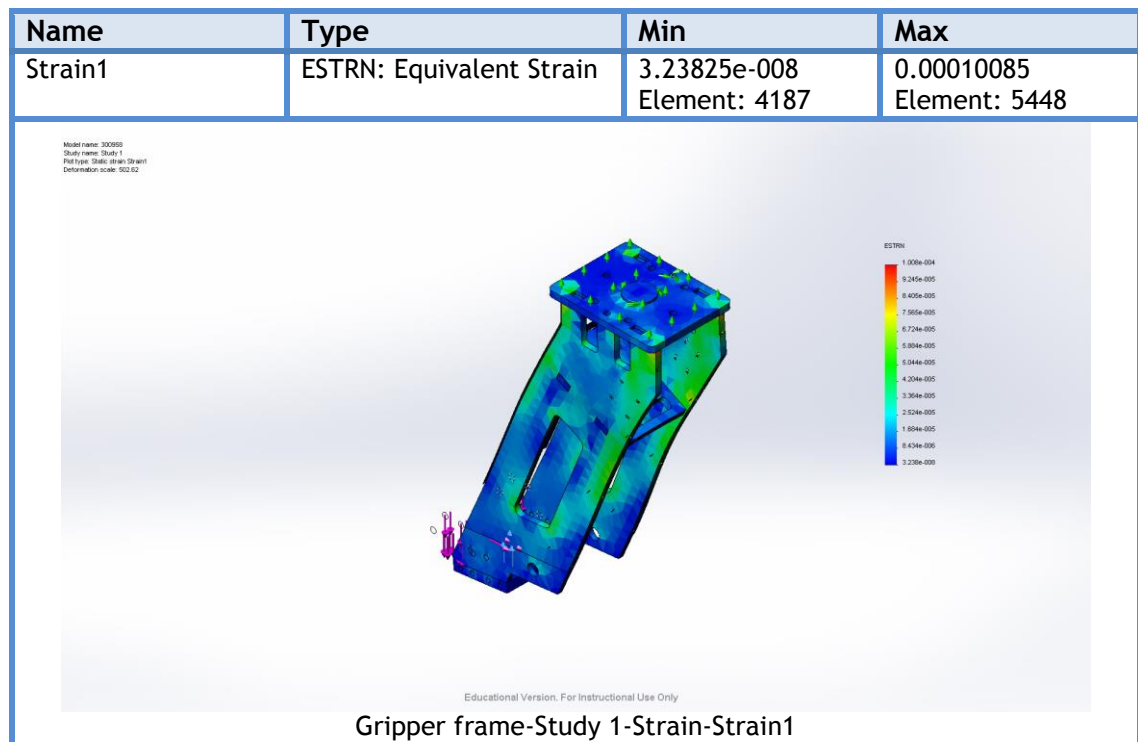
Reaction Moments

Selection set	Units	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultant
Entire Model	N·m	0	0	0	1e-033

Study Results







Conclusion

Maximum displacement of the simulation is acceptable. Material thickness ranging from 10mm to 16mm was chosen for the frame plates.